



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Toni Rantanen

3D-mittaus- ja -mallinnusprosessit kulttuurin alan pelillistämisessä laajennetun todellisuuden avulla

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.09.2019

Valvoja: Professori Matti Vaaja

Ohjaajat: Hannu Hyypä ja Juho-Pekka Virtanen

Tekijä Toni Rantanen

Työn nimi 3D-mittaus- ja -mallinnusprosessit kulttuurin alan pelillistämisessä laajennetun todellisuuden avulla

Maisteriohjelma Master's Programme in Geoinformatics

Koodi ENG22

Työn valvoja Prof. Matti Vaaja

Työn ohjaajat Prof. Hannu Hyyppä ja TaM Juho-Pekka Virtanen

Päivämäärä 30.09.2019

Sivumäärä 79

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa selvitetään 3D-mittaus- ja -mallinnusprosessit, joilla erilaisista kulttuurin alan kohteista voi muodostaa automaattisesti tai puoliautomaattisesti pelimoottoriin soveltuvia 3D-malleja. Mallin kriteereiksi asetettiin soveltuvuus pelimoottorilla tehtävään visualisointiin ja pelillistämiseen laajennetun todellisuuden avulla. Työssä osallistuttiin osana tutkimusryhmää kolmeen erilaiseen esimerkkitapaukseen, joiden pohjalta soveltuvat prosessit johdettiin. Esimerkkitauposten kohteina olivat Dipoli, Kansallismuseon esineet ja Suomenlinnan vankityrnat. Mittausmenetelminä hyödynnettiin laserkeilausta, fotogrammetriaa ja syvyyskamerapohjaista mittausta. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan 3D-mittauksen ja -mallinnuksen sekä pelillistämisen ja peliteknologian hyödyntämisen nykytilaa. Lisäksi esitellään erilaisia kulttuurin alan sovelluksia sekä nykyaikaisten mittaus- ja mallinnusprosessien kulkua.

Työn tuloksena syntyi menetelmäkohtaiset prosessikuvaukset pelimoottorikelpoisen 3D-mallin tuottamiseksi. Prosessikuvausten pohjalta pohdittiin menetelmien soveltuvuutta, toimintaa ja rajoituksia sekä vertailtiin tuloksia tutkimuskirjallisuuteen. Lisäksi tehtiin katsaus tulevaisuuden mahdollisuuksiin ja niiden vaikutuksiin esimerkkitapauksen kanalta.

Avainsanat 3D-mittaus, 3D-mallinnus, laserkeilaus, fotogrammetria, syvyyskamera, kulttuurin ala, pelimoottori, pelillistäminen, laajennettu todellisuus

Author Toni Rantanen

Title of thesis 3D Measuring and modelling processes in gamifying culture with extended reality

Master programme Master's Programme in Geoinformatics

Code ENG22

Thesis supervisor Prof. Matti Vaaja

Thesis advisors Prof. Hannu Hyyppä and MA Juho-Pekka Virtanen

Date 30.09.2019

Number of pages 79

Language Finnish

Abstract

This study investigates the 3D measurement and modeling processes needed to automatically or semi-automatically create 3D models from a variety of cultural attractions for use in game engines. The criteria for the model were suitability for game engine visualization and gamification through augmented reality. Suitable processes were derived from three different case studies by taking part in them. The case studies used, were Dipoli, objects from National museum and the jail cells of Suomenlinna. Laser scanning, photogrammetry and depth camera technology were used as the measurement methods. The literature review gives an overview of the current state of 3D measurement and modeling as well as gamification and game technology utilization. In addition, various cultural 3D applications and the phases of modern measurement and modeling processes will be introduced.

The work resulted in method-specific process descriptions to produce a game engine-suitable 3D model. Based on the process descriptions, the applicability, functionality and limitations of the methods were discussed, and the results compared to the research literature. In addition, a review was made of future opportunities and their implications for case studies.

Keywords 3D-measuring, 3D-modelling, laser scanning, photogrammetry, depth-camera, culture, game-engine, gamification, extended reality

Alkusanat

Tämä tutkimus tehtiin Aalto-yliopiston Rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutille. Kiitän seuraavia projekteja: Tekes ”Varpu”, Suomen Akatemia ”Point-cloud Ecosystem - Combat”, EU EAKR ”3D-kulttuurihubi” ja Aalto Excellence ”3D Culture Hub”.

Tahdon esittää erityiskiitokset työn valvojana toimineelle Matti Vaajalle sekä ohjaajilleni Juho-Pekka Virtaselle ja Hannu Hyypälle. Kiitokset myös Kansallismuseolle ja erityisesti Hanna Forssellille. Lisäksi haluan kiittää Matti Kurkelaa, Hannu Handolinia, Arttu Julinia, Marika Ahlavuota ja muita Rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutin työntekijöitä kaikesta yhteistyöstä, avusta ja tuesta, jota olen saanut työn aikana. Lopuksi vielä kiitos perheelleni ja kavereilleni henkisenä tukena olemisesta.

Espoo 18.9.2019

Toni Rantanen

Sisällysluettelo

Käsitteet	7
1. Johdanto	9
1.1 Tausta	9
1.2 Tutkimuksen rajausta ja käsitteiden määrittely	9
1.2.1 3D-mittaus ja -mallinnus	9
1.2.2 Kulttuurin ala ja sovellukset	9
1.2.3 Pelillistäminen ja peliteknologian hyödyntäminen	9
1.2.4 Laajennettu todellisuus	10
1.2.5 Pelimoottorit	11
1.3 Tutkimuskysymys	11
1.4 Tutkimusaineistot, -menetelmät ja rakenne	11
2 State of Art	12
2.1 3D-mittaus ja -mallintaminen	12
2.1.1 Maalaserkeilaus	12
2.1.2 Mobiililaserkeilaus	12
2.1.3 Kuvapohjainen mittaus	13
2.1.4 Syvyyskamerapohjainen mittaus	13
2.1.5 3D-mallinnus	14
2.2 Kulttuurin alan 3D-sovellukset	14
2.2.1 Virtuaalimuseot ja -taidenäyttelyt	14
2.2.2 Kulttuuriperinnön digitointi	17
2.2.3 Virtuaaliset audioinstallaatiot	18
2.2.4 360° -virtuaalikonsertit	19
2.2.5 Virtuaalielokuvateatteri	20
2.3 Pelillistäminen ja peliteknologian hyödyntäminen	21
2.4 3D-mittaus- ja -mallinnusprosessit	23
2.4.1 Valokuvapohjainen mittaus- ja mallinnusprosessi	23
2.4.2 Maalaserkeilausaineiston keruu ja käsittely	24
2.4.3 Hybridimittaus- ja mallinnusprosessi	24
2.4.4 Syvyyskamerapohjainen mittaus- ja mallinnusprosessi	25
2.4.5 Pällemallinnus	26
2.4.6 Mallien vienti pelimoottoreihin	26
3 Menetelmät	27
3.1 Käytettävät ohjelmistot	27
3.2 Käytettävät laitteet	29
3.2.1 Faro Focus ^{3D} S120 -laserkeilain	29
3.2.2 Faro Focus S350 -laserkeilain	29
3.2.3 Kamerajärjestelmät	29
3.2.4 Matterport Pro2 3D	31
3.2.5 GeoSLAM Zeb Revo RT	32
3.2.6 HTC Vive Pro -virtuaalitodellisuusjärjestelmä	33
3.3 Esimerkitapaus 1: Dipoli	34
3.3.1 Laseraineiston kerääminen ja käsittely	34
3.3.2 Kuva-aineiston kerääminen ja käsittely	34

3.3.3	Laser- ja kuva-aineistojen yhdistäminen ja orientointi.....	35
3.3.4	Mallin muodostaminen ja teksturointi	36
3.3.5	Päällemallinnusprosessi	37
3.3.6	Pelimoottoriin vienti ja visualisointi.....	40
3.4	Esimerkkitapaus 2: Kansallismuseon esineet.....	42
3.4.1	Kuva-aineiston kerääminen ja käsittely	42
3.4.2	Mallin muodostaminen ja teksturointi	43
3.4.3	Pelimoottoriin vienti ja visualisointi.....	47
3.5	Esimerkkitapaus 3: Suomenlinnan vankityrmät.....	48
3.5.1	Laseraineiston kerääminen ja käsittely	49
3.5.2	Kuva-aineiston kerääminen ja käsittely	49
3.5.3	Matterport Pro2 3D -aineiston kerääminen ja käsittely	50
3.5.4	Laser- ja kuvadatan yhdistäminen	50
3.5.5	Mallien muodostaminen ja teksturointi	50
3.5.6	Päällemallinnusprosessi	51
3.5.7	Matterport-aineiston käsittely	54
3.5.8	Hybridimallin pelimoottoriin vienti ja visualisointi	54
3.5.9	Matterport-mallin pelimoottoriin vienti ja visualisointi	56
4	Tulokset.....	58
4.1	Dipoli.....	58
4.2	Kansallismuseon esineet	60
4.3	Suomenlinnan vankityrmät	62
5	Vertailua	64
5.1	Havainnot esimerkkitapauksista.....	64
5.1.1	Dipoli	64
5.1.2	Kansallismuseon esineet	64
5.1.3	Suomenlinnan vankityrmät	64
5.2	Esimerkkitapausten väliset havainnot	65
5.2.1	Kuvapohjainen menetelmä	65
5.2.2	Hybridimenetelmä	65
5.2.3	Syvyyskamerapohjainen menetelmä.....	66
5.3	Tuloksia koskevat rajoitukset.....	66
5.4	Tulevaisuuden näkymät	67
5.4.1	Vaikutukset esimerkkitapausten kannalta.....	68
6	Yhteenveto	69

Käsitteet

AR,	Augmented Reality, Lisätty todellisuus
Beikkaus,	3D mallien yksityiskohtien siirtämistä toisiin malleihin. Esimerkiksi korkean tarkkuuden mallin tekstuurien siirtäminen matalan tarkkuuden malliin
BIM,	Building Information Model, Rakennuksen tietomalli
CAD,	Computer aided design, Tietokoneavusteinen suunnittelu
DMVR,	Dense Multi-View 3D Reconstruction, Fotogrammetrinen menetelmä kolmiulotteisen rakenteen muodostamiseksi kaksiulotteisista kuvista
GNSS,	Global Navigation Satellite System, Globaali satelliittipaikannusjärjestelmä
HDR,	High Dynamic Range, Laaja dynaaminen alue
ICP,	Iterative closest point algorithm, Iteratiivinen lähimmän pisteen algoritmi
IMU,	Inertial measurement unit, Inertiaalinen mittausyksikkö
Normaalikartoitus,	menetelmä, jonka avulla on mahdollista lisätä 3D-mallien yksityiskohtia geometriaan koskematta
Päällemallinnus,	manuaalista mallinnusta mittadatapohjaisten mallien päälle
SfM,	Structure from motion, Fotogrammetrinen menetelmä kolmiulotteisen rakenteen muodostamiseksi kaksiulotteisista kuvista
SLAM,	Simultaneous localization and mapping, Samanaikainen paikannus ja kartoitus
ToF,	Time-of-Flight, Laserkeilauksen mittausmenetelmä, joka perustuu lähetetyn ja takaisin heijastuneen lasersäteen lentoaikaan
Unwrappaus,	3D-mallien pinnan avaaminen kaksiulotteiseksi tasoksi, jonka avulla tekstuurit projisoidaan mallin päälle
UV-kartta,	kertoo kuinka tekstuurit projisoidaan avatun 3D-pintamallin päälle
Vaihe-ero,	Laserkeilauksen mittausmenetelmä, joka perustuu lasersäteiden vaihe-erojen vertailuun

Verteksi,	3D-geometrian kulmapisteitä, joilla voi koordinaattien lisäksi olla muita ominaisuuksia
VR,	Virtual Reality, Virtuaalitodellisuus

1. Johdanto

1.1 Tausta

3D-mittausmenetelmien, kuten laserkeilauksen ja fotogrammetrian käyttö on yleinen ja tehokas tapa mallintaa ympäröivää maailmaa (Remondino, 2011). Menetelmiä on käytetty muun muassa kulttuuriperintökohteiden mallinnukseen jo huomattavan kauan (Haala & Alshawabkeh, 2006). Nykypäivänä teknologian kehityksen luomien mahdollisuuksien ja laajennetun todellisuuden käytön yleistymisen myötä myös erilaiset kulttuuripalveluiden tarjoajat ovat alkaneet hyödyntämään 3D-grafiikan ja pelillistämisen tuomia mahdollisuuksia immersion ja interaktiivisuuden lisäämiseksi (Sieck et al., 2016). Aiheen ajankohtaisuuden ja yleispätevien prosessikuvausten puutteen vuoksi tässä työssä tutkimuksen kohteena ovat ne prosessit, joilla kulttuurikohteista tuotetaan 3D-malleja pelimoottoreilla muodostettavia sovelluksia varten. Soveltuvat prosessit selvittämällä pyritään takaamaan lopputuotteiden onnistuminen vastaavia menetelmiä käyttämällä.

1.2 Tutkimuksen rajaus ja käsitteiden määrittely

1.2.1 3D-mittaus ja -mallinnus

Tässä työssä käsitellään mittausta ja mallinnusta hyödyntäen sekä aktiivisia että passiivisia mittausmenetelmiä (Remondino & Hakim, 2006). Suhteellisen laajan luonteensa vuoksi 3D-mittauksen käsite on rajattu maalaserkeilaukseen, mobiililaserkeilaukseen, fotogrammetriaan ja syvyyskamerajärjestelmiin. Mallinnuksessa hyödynnetään mittadatapohjaisuuden vuoksi vain automaattisia ja puoliautomaattisia menetelmiä. Kokonaan käsin mallinnetut toteutukset ovat tästä syystä rajattu kokonaan pois tutkimuksen laajuudesta.

1.2.2 Kulttuurin ala ja sovellukset

Kulttuurin ala on määritelty tässä työssä koskemaan kulttuuriperintökohteita (Remondino, 2011), museota (Kersten et al., 2017), esittävää taidetta (esim. konsertteja) (Sieck et al., 2016) ja audiovisuaalisia installaatioita (Virtanen et al., 2018). Mittausteknologioiden yhteydessä kulttuurin alan sovellukset voidaan jakaa karkeasti livemuotoisiin ja staattisiin. Livemuotoiset sovellukset perustuvat yleensä reaaliaikaiseen teleläsnäoloon esimerkiksi 360°-kameroita hyödyntämällä. Staattiset sovellukset perustuvat puolestaan mallinnettuihin kohteisiin. Staattiset kohteet voidaan edelleen jakaa olemassa olevan ympäristön jäljennöksiin, vanhojen ympäristöjen uudelleentoteutukseen ja täysin fiktiivisiin kohteisiin. Esimerkiksi kulttuuriperintökohteiden dokumentointi lukeutuu olemassa olevan ympäristön replikointiin ja osin tuhoutuneiden kulttuurikohteiden tietoon perustuvaa jälleenrakentamista voidaan pitää uudelleentoteuttamisena. Fiktiiviset kohteet eivät perustu olemassa oleviin kohteisiin, mutta voivat silti näyttää hyvin realistisilta ja luoda samankaltaisia kokemuksia. Tässä työssä käsitellään vain staattisia sovelluksia olemassa olevien kohteiden kannalta.

1.2.3 Pelillistäminen ja peliteknologian hyödyntäminen

Pelillistäminen on suhteellisen uusi käsite ja siitä on olemassa hieman toisistaan eriäviä määrittelyitä, joskin niiden perusidea on hyvin samankaltainen. Esimerkiksi (Morschheuser et al., 2017) määritelmän mukaan käsite viittaa ohjelmistojen rikastamiseen peleistä tutuin suunnitteluominaisuuksin, jotka herättävät käyttäjissä pelinkaltaisia kokemuksia. Pelisuunnitteluelementtejä, kuten esimerkiksi pisteitä, merkkejä ja edistymisen arviointia voidaan käyttää tiedon jakamisen, järjestelmien käytön ja tuottavuuden lisäämiseksi. Pelillistämisen

käytöllä on tutkimusten mukaan positiivisia vaikutuksia muun muassa motivaatioon, sosiaaliseen käyttäytymiseen ja tehokkuuteen. Tavoitteet, säännöt ja erilaiset haasteet ovat pelien tunnusomaisimmat piirteet ja todennäköisimmin motivoivien kokemusten aiheuttajia. (Morschheuser et al., 2017) Tämän työn osalta pelillistämistä käsitellään vain kulttuurin alan sovelluksissa ja sillä tarkoitetaan lisäarvon tuomista 3D-mallinnettuihin kulttuurikohteisiin esimerkiksi interaktiivisuuden ja tarinankerronnan kautta.

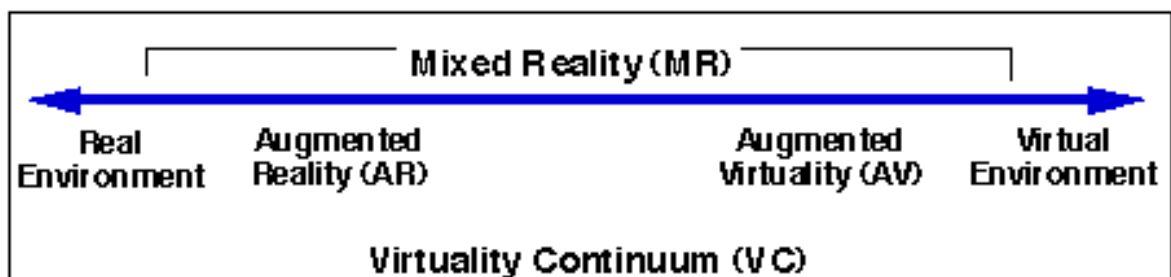
Siinä missä pelillistäminen liittyy peleistä ominaisen dynamiikan lainaamiseen, peliteknologian hyödyntäminen puolestaan liittyy (video)pelien tuottamiseen käytettävien järjestelmien hyödyntämistä esimerkiksi visualisoinnin apukeinona. Peliteknologiaa ovat käytännössä kaikki ohjelmistot, laitteet ja menetelmät, joita vaaditaan pelien kehittämiseen ja pelaamiseen, esimerkiksi pelimoottorit ja virtuaalitodellisuusjärjestelmät.

”Vakavien pelien” (Serious games, Susi et al., 2007) huipputeknologia on yhdenmukainen viihdetarkoitukseen tehtyjen pelien teknologian kanssa, jonka vuoksi kaikki kehitys tietokonepelien, reaaliaikaisten grafiikoiden, laajennetun todellisuuden ja tekoälyn saralla koskee myös ”vakavia” pelejä. (Anderson et al., 2010) Tässä työssä käsitellään pelillistämisen lisäksi myös tapauksia, joissa on hyödynnetty peliteknologiaa.

1.2.4 Laajennettu todellisuus

Laajennettu todellisuus on ideana varsin vanha ja sen juuret juontavat jo 1960-luvulta. Vasta viime aikoina teknologian kehityksen myötä on koettu laajennetun todellisuuden uusi tuleminen. Laajennetun todellisuuden ideana on immersoida/uppouttaa käyttäjä kokemaan jostain täysin virtuaalista tai virtuaalisen ja todellisen yhdistelmää kuin olisi aidosti tilanteessa läsnä. (Mazuryk & Gervautz, 1999) Tyypillisesti sovellukset ovat olleet vahvasti pelillisiä, mutta myös erilaisille kulttuurin, urheilun ja matkailun sovelluksille on kysyntää (Consumer Technology Association, 2017).

Laajennettu todellisuus koostuu kaikista todellisen ja virtuaalisen sisällön yhdistelmistä. Milgram ja Kishino ovat määritelleet laajennetun todellisuuden jatkumon alla olevan (kuvan 1) mukaisesti.



Kuva 1. Laajennetun todellisuuden jatkumo. (Milgram & Kishino, 1994)

Pääasialliset laajennetun todellisuuden käyttöön tarvittavat järjestelmät ovat näytöt, tietokoneet, seurantalaitteet ja syöttölaitteet. Virtuaalitodellisuus on muuttunut kohtuuhintaisten ja yksinkertaisten massamarkkinoille suunnattujen virtuaalitodellisuuslaitteiden ja sovellusten myötä helpommin saavutettavaksi. (Bekele et al., 2018) Tämän työn osalta laajennettu todellisuus liittyy 3D-mittaus- ja mallinnusprosessin lopputuotteeseen, asettaen tiettyjä visuaalisia ja geometrisiä rajoituksia ja vaatimuksia tuotettavalle mallille. Laajennetun todellisuuden muodoista tutkimuksessa käsitellään vain virtuaalitodellisuutta (VR).

1.2.5 Pelimoottorit

Pelimoottorit ovat tietokonepelien sekä muiden samantapaisten sovellusten rakennusalus-
toja, jotka tarjoavat tarvittavan infrastruktuurin ja työkalut sovellusten kehittämiseen. Nyky-
aikaiset interaktiiviset virtuaaliympäristöt ovat pääosin toteutettu pelimoottoreiden avulla.
(Anderson et al., 2010) Tyypilliset pelimoottorit tarjoavat kehittäjälle muun muassa skrip-
taus-, kuvankäsittely-, tekoäly-, fysiikka-, animointi-, elokuva-, verkkototeutus- ja resurs-
sienhallintatyökalut (Navarro et al., 2012).

Pelimoottoreita on olemassa kaupallisia, kuten Unreal Engine 4 ja Unity 5. Kaupalliset pe-
limoottorit ovat tyypillisesti ilmaisia käyttää, mutta muuttuvat maksullisiksi, kun pelimoot-
torilla kehitetyillä tuotteilla alkaa tuottamaan rahaa. Avoimeen lähdekoodiin perustuvia pe-
limoottoreita, kuten Babylon.js (Babylon.js, 2019) ja Godot (Godot, 2019), voi sen sijaan
käyttää täysin ilmaiseksi myös tuotantomielessä. Avoimen lähdekoodinsa vuoksi mootto-
reita voi myös kehittää haluamaansa suuntaan. Pelimoottoreita hyödynnetään tässä työssä
3D-mallien visualisointiin. Työssä käytettävät pelimoottorit ovat Unreal Engine 4 (Epic Ga-
mes, 2019) ja Unity 5 (Unity, 2019).

1.3 Tutkimuskysymys

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää ne 3D-mittaus- ja -mallinnusprosessit, joilla erilaisista
kulttuurin alan kohteista tuotetaan automaattisesti tai puoliautomaattisesti pelimoottoriin so-
veltuva 3D-malli. Mallia tulisi pystyä käyttämään pelimoottoreissa osana kulttuurin alan
kohteiden visualisointia ja pelillistämistä laajennetun todellisuuden avulla. Soveltuva malli
on visuaalisesti realistinen ja geometrisesti tarkka sekä kevyt toimiakseen sulavasti peli-
moottorilla kehitetyissä reaaliaikaisissa sovelluksissa ja asianmukaisilla laitteilla. Varsi-
naista pelimoottoreissa tapahtuvaa mallien toiminnallisuuden lisäämistä ei tässä työssä kä-
sitellä.

1.4 Tutkimusaineistot, -menetelmät ja rakenne

Erilaisten kulttuurin alan 3D-sovellusten nykytilaa sekä 3D-mallien tuottamiseksi soveltuvia
prosesseja on selvitetty kirjallisuuskatsauksella. Työn kokeellinen osa esitellään esimerkki-
tapausosiossa. Esimerkkitapausosiossa on osallistuttu osana Aalto-yliopiston Rakennetun
ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutin tutkimusryhmää kolmeen eri mittaus- ja
mallinnusprojektiin. Projekteissa 3D-mittausta ja -mallinnusta on hyödynnetty käytännössä
soveltuvien prosessien selvittämiseksi ja raportoimiseksi.

Tutkimuksessa käsitellään kulttuurin alan 3D-sovellusten, 3D-mittauksen ja -mallinnuksen
sekä pelillistämisen ja peliteknologian nykytilaa state of art osiossa. Tämän jälkeen mene-
telmäosiossa esitellään osallistumista kolmeen eri mittaus- ja mallinnusprojektiin osana tut-
kimusryhmää sekä työssä käytetyt laitteet ja ohjelmat. Tulosesio koostuu menetelmäosion
esimerkkitapauksista johdetuista mittauksen ja -mallinnuksen prosesseista. Tulosesion jäl-
keen menetelmien välisiä eroja vertaillaan toisiinsa sekä tutkimuskirjallisuuteen ja esitellään
tuloksia koskevat rajoitukset. Lisäksi pohditaan kulttuurin alan 3D-mittauksen ja -mallin-
nuksen tulevaisuuden näkymiä. Lopuksi tutkimus päätetään yhteenvetoon.

2 State of Art

2.1 3D-mittaus ja -mallintaminen

3D-mittaus on tapa taltioida ympäristön geometriaa kolmiulotteisesti hyödyntäen erilaisia mittausmenetelmiä. Yleisesti ottaen 3D-mittauksessa käytettävät mittalaitteet on jaettu passiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin. Passiiviset sensorit (esim. digikamerat) tuottavat ympäristön valoa taltioimalla kuvadataa, jota prosessoidaan matemaattisesti 3D-tiedon irrottamiseksi 2D-kuvamittauksista. Sen sijaan aktiiviset sensorit (esim. laserkeilaimet) pystyvät tuottamaan 3D-dataa suoraan, tuottamalla itse havaitsemansa valon. (Remondino, 2011) Laserkeilausta ja fotogrammetriaa yhdistämällä pystytään täydentämään kummankin menetelmän heikkouksia, mikä parantaa mallinnuksen tarkkuutta, tulkintaa ja ympäristön luokittelua (Rönnholm et al., 2007). Laserkeilauksen ja fotogrammetristen menetelmien yhdistämistä pidetään parhaimpana tapana 3D-mallintaa rakennettua ympäristöä. (Balsa-Barreiro et al., 2017)

2.1.1 Maalaserkeilaus

Maalaserkeilaus (Vosselman & Maas, 2010) on luonteeltaan aktiivinen mittausmenetelmä, jonka toiminta perustuu lasersäteiden avulla kerättävään 3D-mittadataan. Laserkeilaamalla pystyy tuottamaan korkean geometrisen tarkkuuden omaavia tiheitä pistepilviä lähes automaattisesti. Laserkeilainten etuina voidaan pitää lähes välitöntä 3D-pistepilvien luontia, veden ja kasvillisuuden osittaista läpäisykykyä, etäisyysmittauksen tarkkuutta sekä soveltuvuutta tekstuurittomien ja pimeiden kohteiden mittaukseen (Rönnholm et al., 2007). Staattisen maalaserkeilauksen heikkouksina voidaan puolestaan pitää itse laserkeilainten ja käyttöön vaadittavien ohjelmistojen erittäin korkeaa hintaa, pitkiä mittausaikoja sekä laadukkaan väri-informaation puutetta suoraa teksturointia varten. (Georgantas et al., 2012)

Maalaserkeilaimet ovat hyvin suosittuja ympäristön geometrian taltiointiin käytettäviä mittalaitteita. Ne ovat saaneet osakseen paljon huomiota viime vuosina 3D-mittauksen ja mallinnuksen saralla (Remondino, 2011). Keilaimia on olemassa moniin eri käyttötarkoituksiin, mutta toimintaperiaatteeltaan ne ovat keskenään hyvin samankaltaisia ja perustuvat lähtökohtaisesti lasersäteiden kulkuaikojen avulla tapahtuvaan etäisyyksien mittaamiseen. Maalaserkeilaimissa käytettyjä etäisyysmittausmenetelmiä on pääasiassa kaksi erilaista, pulssi- (time-of-flight) ja vaihe-ero- (phase shift) pohjainen menetelmä. Keilainten mittausetäisyydet ja tarkkuudet riippuvat täysin keilaimen ominaisuuksista sekä sen käyttämästä etäisyysmittausmenetelmästä. Nykyaikaisissa laserkeilaimissa on usein myös integroitu värikamera pistepilvien ja 3D-mallien värittämistä ja datan tulkinnan helpottamista varten. (Vosselman & Maas, 2010)

2.1.2 Mobiililaserkeilaus

Mobiililaserkeilaus on laserkeilausmenetelmä, jossa laserkeilain on yhdistetty liikkuvaan alustaan. Mobiililaserkeilausjärjestelmät voidaan jakaa käyttämänsä paikannusmenetelmän perusteella satelliittipaikantaviin ja itsepaikantaviin. Satelliittipaikantavat menetelmät käyttävät tyypillisesti GNSS-paikanninta ja IMU-järjestelmää paikannukseen. Itsepaikantavat menetelmät nojaavat sen sijaan esimerkiksi SLAM-algoritmiin ja IMU-järjestelmään. Menetelmän avulla on mahdollista kartoittaa nopeasti laajoja alueita. (Kukko et al., 2012; Thomson et al., 2013)

2.1.3 Kuvapohjainen mittaus

Kuvapohjainen mittaus on passiivinen mittausmenetelmä sillä se perustuu vain järjestelmän ulkopuolisen valon taltiointiin. Sen pääasiallinen käyttötarkoitus on kohteiden digitaalinen tai graafinen kolmiulotteinen rekonstruointi (Luhmann, 2006). Viime vuosikymmenellä digikuvauksen ja fotogrammetristen ohjelmistojen kehitys yhdessä halventuneiden hintojen kanssa on laajentanut fotogrammetristen menetelmien sovelluskenttää. Laitteistokustannusten ja laskenta-aikojen putoamisen myötä koko prosessista on tullut kustannustehokkaampi. Kuvapohjaisen mittauksen lähtökohtana on osin päällekkäisten kuvien ottaminen, jolla pyritään jäljittämään ihmisen stereoskooppista näköjärjestelmää. Mittaus vaatii jonkin verran tietotaitoa, sillä laadukkaan kuvadatan tuottaminen pitää sisällään monien eri asioiden huomioimista. Mittauskelpoisen kuvadatan kannalta tärkeää on muun muassa kuvien terävyyden, yhtenäisen valotuksen sekä riittävän kuvapeiton varmistaminen. (Matthews, 2008) Vältettäviä kuvauskohteita ovat dynaamiset, valottomat, tasaväriset ja kiiltävät kohteet, koska ne vaikeuttavat laskentaprosessia ja saattavat vaikuttaa lopputuloksen epäonnistumiseen (Lachambre et al., 2017). Laserkeilaukseen verrattuna kuvapohjaisia 3D-rekonstruktio tekniikoita pidetään halpoina ja tehokkaina työkaluina korkealaatuisten oikeaa maailmaa kuvaavien 3D-mallien tuotannossa laitevaatimusten, taustatietojen ja työtuntien määrässä mitattuna (Shao et al., 2015). Etuina voidaan pitää myös menetelmän joustavuutta, nopeaa mittausaikaa ja suoraan kuvien perusteella teksturoituja pistepilviä. Geometrinen tarkkuus on kuitenkin vahvasti riippuvainen esineen tekstuurista, kameran kalibroinnista, tukipisteiden käytöstä, kuvien resoluutiosta ja kuvausverkon geometriasta. (Georgantas et al., 2012) Digikamera on yksi halvimmista ja yleisimmistä 3D-mittaukseen soveltuvista laitteista. 3D-mallinnukseen soveltuvaa mittausdataa on nykypäivänä mahdollista tuottaa lähestulkoon millä tahansa digikameralla, jopa älypuhelimien sisältämällä kameroilla (Lachambre et al., 2017). Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että kaikki kamerat tuottaisivat yhtä laadukkaan lopputuloksen. Laadukkaan datan tuottamiseksi mittaamiseen käytettävän kameran on oltava sisäiseltä geometrialtaan stabiili. Useimmiten tämä saavutetaan kameroilla, joissa ei ole kuvan vakautusta ja joissa tarkennuksen voi lukita. (Matthews, 2008) Lisäksi täyden kennon kameraa suositellaan, sillä korkean resoluution myötä fotogrammetriseen rekonstruktioon vaadittavien kuvien määrä vähenee (Lachambre et al., 2017).

2.1.4 Syvyyskamerapohjainen mittaus

Syvyyskameroilla tehtävä mittaus on suhteellisen uusi aktiivinen kolmiulotteisten pintojen mittausmenetelmä, joka tallentaa värikuvia ja pikselikohtaista syvyystietoa. Syvyyskameroiden toiminta perustuu tyypillisesti joko aktiivisen stereon tai kulkuajan (time-of-flight) perusteella tapahtuvaan pikselikohtaisen syvyystiedon arviointiin. (Henry et al., 2012). Syvyysdata korreloidaan värikameran datan kanssa, jolloin syntyy värikuva, jonka jokaisella pikselillä on syvyysarvo. Lopullisena tuloksena on tyypillisesti pistepilvi, jossa pisteillä on muun muassa väri ja normaali-informaatio (Litomisky 2012).

Syvyyskamerajärjestelmiä löytyy sekä käsikäyttöisiä että jalustan päällä toimivia (esim. Structure, 2019; Matterport, 2019). Järjestelmät tallentavat laserkeilaimiin verrattuna heikompiresoluutioista syvyys- ja väri-informaatiota. Järjestelmien vahvuutena on niiden automaattisuus, nopeus sekä kyky mitata myös tekstuurittomia pintoja. Menetelmän heikkouksina voidaan puolestaan pitää hyvin lyhyttä, usein alle 5 metrin mittausetäisyyttä, syvyysestimaattien kohinaisuutta sekä varsin rajallista näkökenttää verrattuna muihin 3D-mittauksessa käytettyihin järjestelmiin. (Henry et al., 2012) Lisäksi menetelmä soveltuu heikosti ulkona tehtäviin mittauksiin, sillä auringonvalo sekoittaa sensorin toiminnan (Virtanen et al., 2018).

2.1.5 3D-mallinnus

3D-mallinnuksen tarkoituksena on kolmiulotteisten digitaalisten mallien tuottaminen joko automaattisesti, puoliautomaattisesti tai täysin manuaalisesti, hyödyntämällä erilaisia mallinnus- ja laskentaohjelmia. Nykypäivänä manuaaliset mallinnusmenetelmät tarkoittavat yleensä tietokoneavusteisilla suunnitteluohjelmilla (CAD) tuotettuja malleja. Automaattiset ja puoliautomaattiset menetelmät puolestaan perustuvat kohteen rekonstruointiin erilaisilla mittalaitteilla tuotetun 3D-datan pohjalta (Bourke, P. 2012). Mallinnus vaatii tyypillisesti ihmisen tulkintaa ja parhaan lopputuloksen saamiseksi on turvauduttava vielä manuaalisiin tai ainakin osin manuaalisiin menetelmiin.

Mittausdatan pohjalta tehtävä automaattinen ja puoliautomaattinen mallinnus perustuu yleensä erilaisilla mittalaitteilla tuotettuun 3D-mittadataan, kuten laserkeilaimilla tuotettuihin pistepilviin. Tyypillisesti mittausdatan pohjalta tehtävän 3D-mallinnuksen päävaiheita ovat pistepilven ”meshaaminen” eli pintamallin muodostaminen, pintamallin geometrian ja virheiden manuaalinen korjaaminen, pintamallin automaattinen tai manuaalinen harvennus sekä tekstuuri- ja normaalikartan luominen. Kuvapohjaisten menetelmien osalta laskentaohjelmat muodostavat myös pintamallin muodostamiseen käytettävän pistepilven käyttäen tyypillisimmin Structure-from-Motion (SfM) (Westoby et al., 2012) ja Dense Multi-View 3D Reconstruction (DMVR) (Furukawa & Ponce, 2010) -menetelmiä. Kuvapohjaisen pistepilven laskentaa ei voi täysin erottaa mittauksesta, jolloin se sijoittuu johonkin mittaus ja mallinnusprosessin välimaastoon. Mallinnusta on myös muunkin tyylistä, mutta pelimooottoreihin tuottaessa tavoitteena on tyypillisesti teksturoitu mesh-malli.

Mallien koot, varsinkin geometrian ja tekstuurien osalta, kasvavat nopeammin kuin tietokonelaitteistot ja ohjelmistot kehittyvät, mikä rajoittaa mahdollisuuksia reaaliaikaiseen ja interaktiiviseen yksityiskohtaiseen todellisuuspohjaiseen 3D:hen, etenkin internetissä. Yleisesti suuren datamäärän ja sen monimutkaisuuden takia suurten 3D-mallien renderöinti tehdään moniresoluutiota hyödyntämällä, jolloin suuret teksturoidut pintamallit esitetään käyttäen eri yksityiskohtaisuuden tasoja ja yksinkertaistamiskeinoja. (Remondino, 2011)

2.2 Kulttuurin alan 3D-sovellukset

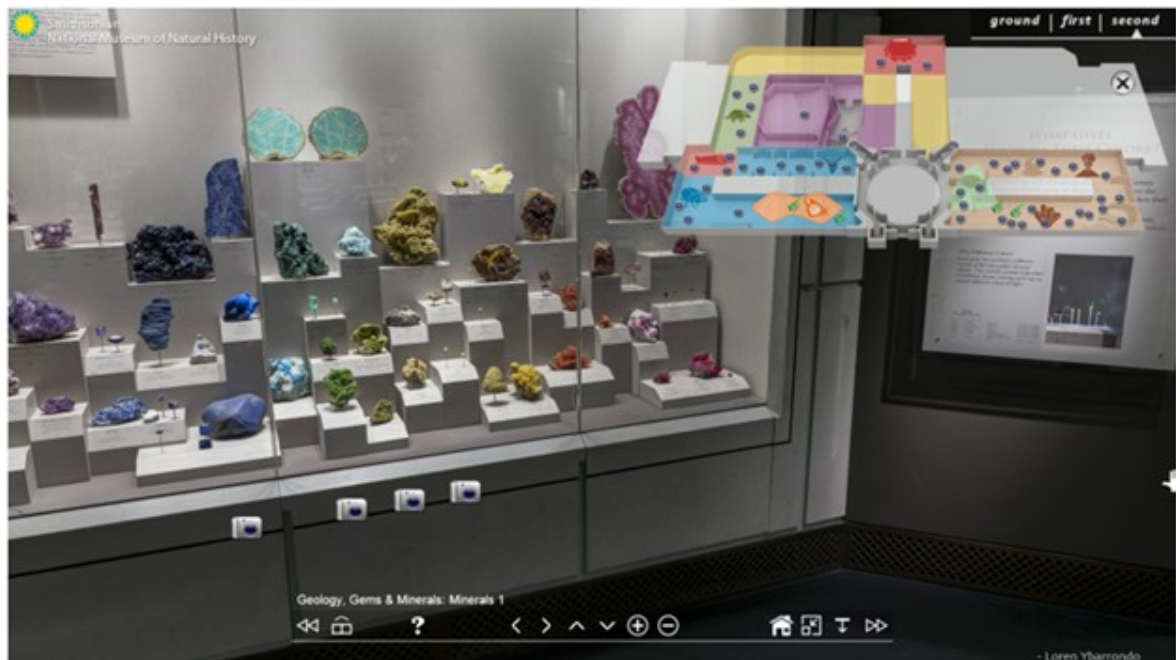
Laajennetun todellisuuden teknologian kehityksen ja yleistymisen myötä on alkanut ilmetymään myös erilaisia kulttuurin alaan liittyviä laajennetun todellisuuden sovelluksia. Kulttuuritapahtumien mallinnus ja digitointi mahdollistaa esimerkiksi menneiden tapahtumien elämisen uudelleen. Tapahtumat avautuvat digitaalisuuden myötä myös paljon laajemmalle yleisölle, sillä niiden kokeminen onnistuu ajasta ja paikasta riippumatta, esimerkiksi kotoa käsin. (Ahlavuo et al., 2016) Erilaisia kulttuurin alan sovelluskohteita ovat muun muassa museoiden (Kersten et al., 2017), taidenäyttelyiden (The National Gallery, 2011) ja kulttuuriperintökohteiden digitaaliset versiot (Remondino, 2011), virtuaaliset audioinstallaatiot (Virtanen et al., 2018), 360° kameroilla tuotetut virtuaalikonsertit (Philharmonia Orchestra, 2016) sekä autenttista elokuvateatteria vastaavat virtuaalielokuvateatterit (Bigscreen, 2018).

2.2.1 Virtuaalimuseot ja -taidenäyttelyt

Virtuaalimuseot ovat olleet konseptitasolla suosittu aihe jo useamman vuoden ajan (Tsichritzis & Gibbs, 1991). Kulttuurin alan kohteista museot ovat olleet ensimmäisten joukossa hyödyntämässä digitaalisuutta. Laajennetun todellisuuden hyödyntäminen museoissa on nostessa nykypäivänä ja arviolta jo noin 35% Euroopan museoista on alkanut kehittää jotain 3D-pohjaista esitystapaa. (Pedersen et al., 2017) Virtuaalimuseot pyrkivät jäljittelemään fyysisiä museoita pitäen sisällään sekä konkreettista että aineetonta sisältöä (Bekele et al.,

2018). Museoissa ympäri maailman on lukemattomia esineitä, joita ei voi esittää yleisölle rajallisen tilan, esineen haurauden tai esittelyiden luomisesta ja ylläpidosta aiheutuvien kustannusten vuoksi. Liikkuvat ja useita kokoelmia sisältävät näyttelyt ovat vielä ongelmallisempia kuljetuskustannusten ja korvaamattoman arvokkaiden esineiden vakuuttamisen vuoksi. Tyypillisesti juuri tämän tyyppisissä näyttelyissä on kuitenkin suurin vetovoima ja tuotto. (Walczak et al., 2006) Digitalisoinnin ja laajennetun todellisuuden keinoin voidaan tällaisiakin kokoelmia ja näyttelyitä esittää esimerkiksi internetin kautta paikasta ja ajasta riippumatta sekä esineitä vahingoittamatta. Lisäksi digitalisointi mahdollistaa esineiden yksityiskohtaisemman tarkastelun sekä metatietojen tai muun relevantin informaation esittämisen kohteiden yhteydessä. Pelillistettyjä virtuaalimuseoita voidaan käyttää myös opetus-tarkoituksiin. Tulevaisuuden visioissa kulttuuriperintökohteet, näyttelyt ja kadut voisivat toimia omina elävinä näyttelyinä virtuaalilasien avulla (Pedersen et al., 2017).

Museoista muun muassa Smithsonian National Museum of Natural History on ottanut käyttöönsä virtuaaliset esittelykierrokset, jotka tarjoavat käyttäjilleen virtuaalisen version museon valikoiduista näyttelyistä (kuva 2). Näyttelykierrokset koostuvat useista eri puolilta näyttelyä otetuista panoraama- ja stillkuvista. Panoraamakuvat luovat kokonaiskuvan näyttelytiloista ja korkearesoluutioisia stillkuvia tarkastelemalla pääsee kiinni kohteiden pienempiin yksityiskohtiin. Näyttelyiden katsominen tapahtuu tietokoneella sekä erilaisilla mobiililaitteilla, joiden lisäksi toteutus tukee myös Google Cardboard -virtuaalilasien käyttöä. Virtuaalinäyttelyssä navigointi ei ole täysin vapaata kaksikulmaisen luonteensa vuoksi, vaan tapahtuu eri huoneisiin johtavia nuolia tai yläkulmassa olevan kartan kohteita klikkaamalla. (Smithsonian National Museum of Natural History, 2018)



Kuva 2. Näkymä museon virtuaalisesta näyttelystä. (Smithsonian National Museum of Natural History, 2018)

Lisäksi museon internetsivuilta löytyy myös 3D-galleria, joka käsittää laajan ja alati kasvavan kokoelman erilaisia 3D-mitattuja ja -mallinnettuja esineitä museon kokoelmista. Esineitä ja niiden metatietoja voi tarkastella vapaasti interaktiivisessa 3D-näkymässä (kuva 3).

Näkymässä on mahdollista vertailla eri esineitä keskenään, mitata etäisyyksiä sekä säätää erilaisia asetuksia, kuten valon määrää ja materiaalin ominaisuuksia. (Smithsonian 3D Digitization, 2018)



Kuva 3. Internetpohjaisen gallerian 3D-näkymä, jossa museon skannattuja esineitä voi vapaasti pyöritellä ja tutkia. (Smithsonian 3D Digitization, 2018)

Lontoossa sijaitsevan National Gallery -taidemuseon Sainsbury siivestä on puolestaan toteutettu virtuaalinen taidenäyttely Matterport 3D-kamerajärjestelmällä (kuva 4). Käyttäjä voi liikkua näyttelyssä kuvausasemien välillä, katsella maalauksia ja niiden tietoja lähempää sekä tutkia koko näyttelyä kolmiulotteisesti ylhäältäpäin. Näyttelysovellus toimii tietokoneiden ja mobiililaitteiden lisäksi myös virtuaalitodellisuusjärjestelmillä. (Matterport, 2017; The National Gallery, 2011)



Kuva 4. Näkymä virtuaalisesta taidenäyttelystä. (The National Gallery, 2011)

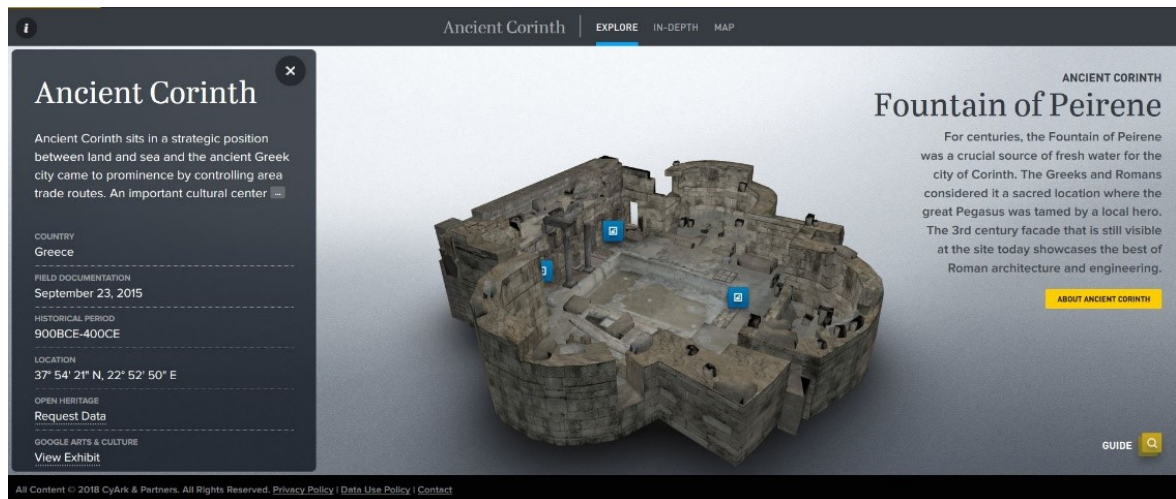
Kersten et al. (2017) luomassa Alt-Segebergin kaupungintalon museon virtuaaliversiossa käyttäjä pääsee tarkastelemaan museota näyttelyineen sisältä ja ulkoa. Varsinaisen virtuaalinäyttelyn lisäksi käyttäjä voi tarkastella kaupungintalon moninaisia rakennusvaiheita 475 vuoden ajalta, mikä tuo kokemukseen neljännen ulottuvuuden (kuva 5). Virtuaalimuseo on toteutettu käyttäen laserkeilausta ja digitaalista fotogrammetriaa mallien luomisessa. Museosta on kaksi eri versiota, interaktiivinen Windows -pohjainen tietokoneversio sekä virtuaalitodellisuusversio HTC Vive -virtuaalilasijärjestelmälle. (Kersten et al., 2017)



Kuva 5. Näkymä virtuaalimuseon sisältä, jossa kaupungintalon rakennusvaiheita voi tarkastella 475 vuoden ajalta. (Kersten et al., 2017)

2.2.2 Kulttuuriperinnön digitointi

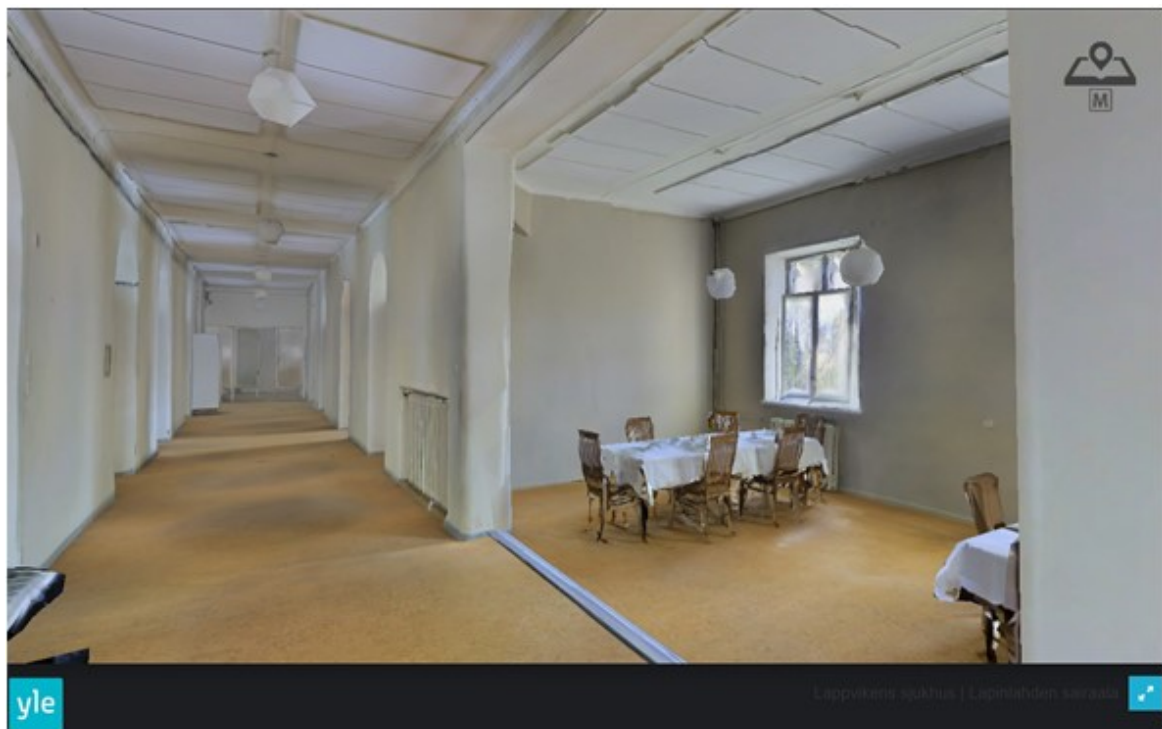
Kulttuuriperintöä on jo jonkin aikaa mallinnettu laserkeilausta ja fotogrammetriaa hyödyntäen ja julkaisuja aiheeseen liittyen löytyy runsaasti (Haala & Alshawabkeh, 2006; Lo Brutto & Spera, 2011; Remondino, 2011; Guarnieri et al., 2012; Grenzdörffer et al., 2015; Lerma et al., 2015; Kersten et al., 2015; Canciani et al., 2016). Menetelmät ovat myös kansainvälisesti hyvin tunnustettuja kulttuuriperinnön saralla. Kulttuuriperinnön digitointia tarvitaan, sillä perintökohteet kärsivät jatkuvasti sotien, luonnonkatastrofien, ilmastonmuutoksen ja ihmisen välinpitämättömyyden vuoksi. Sensoreiden ja mittausmenetelmien jatkuva kehitys on vaikuttanut merkittävästi perintökohteiden digitointiin sekä alan tutkimuksen kasvuun. (Remondino, 2011) Teknologian kehityksen myötä malleista on myös tullut yhä tarkempia ja yksityiskohtaisempia. Kulttuuriperinnön digitointi kulkee luonnollisesti käsi kädessä virtuaalimuseoiden kanssa, sillä mallinnetut kulttuuriperintökohteet soveltuvat mainiosti esitettäväksi virtuaalimuseoissa. Kulttuuriperinnön saralla on 2000-luvun alusta lähtien alettu hyödyntää immersiiivisiä tekniikoita, kuten lisättyä, virtuaalista ja yhdistettyä todellisuutta, jotka tarjoavat erilaisia aistikokemuksia digitaalista ja todellista sisältöä yhdistelemällä. Kulttuuriperintökohteet saavat merkittävää lisäarvoa digitaalista mediaa hyödyntämällä. (Bekele et al., 2018) Esimerkiksi voittoa tavoittelematon CyArk dokumentoi kulttuuriperintökohteita käyttäen hyväkseen laserkeilausta ja fotogrammetriaa (kuva 6). (CyArk, 2019)



Kuva 6. CyArkin tuottama malli kulttuuriperintökohteesta. (CyArk, 2019)

2.2.3 Virtuaaliset audioinstallaatiot

Virtualisoimalla voidaan immersoida käyttäjä kokemaan esimerkiksi erilaisia tilapäisiä tapahtumia audiovisuaalisesti. Muun muassa Virtanen et al. (2018) ovat toteuttaneet virtuaalisen version Ylen ruotsinkielisen radioteatterin Lapinlahden entiseen mielisairaalaan sijoituvasta ääni-installaatiosta ”Ääniä sielujen huoneista”. Virtuaaliversio toteutettiin syvyyskamerapohjaista Matterport -järjestelmää ja pelimoottoriteknologiaa (Unity) hyödyntäen. Virtuaalisessa web-versiossa käyttäjä pääsee liikkumaan mielisairaalan käytävillä ja huoneissa, joissa toistuvat samat äänimaailmat kuin alkuperäisessä installaatiossa (kuva 7). Virtuaaliversiolla saavutetaan laajempi yleisö sekä mahdollistetaan tapahtuman kokeminen vielä varsinaisen tapahtuman loputtua. (Virtanen et al., 2018; YLE, 2016)



Kuva 7. Näkymä virtuaalisen Lapinlahden mielisairaalan sisältä. (Virtanen et al., 2018)

2.2.4 360° -virtuaalikonsertit

Virtuaalikonsertit ovat tapa päästä seuraamaan musiikkikonsertteja hieman eri näkökulmasta. Tyypillisesti konsertit ovat toteutettu käyttäen 360° kameroita, joiden avulla käyttäjälle muodostuu immersio paikan päällä olemisesta. Lisäarvoa konsertteihin tuo mahdollisuus valita eri paikkoihin sijoitettujen kameroiden väliltä haluamansa kuvakulman ja esimerkiksi eri instrumenttien seuraaminen on mahdollista.

Muun muassa Live Nation ja Next VR ovat järjestäneet reaaliaikaisia virtuaalisia versioita konserteista 360° kameroiden avulla (kuva 8). Konsertteja pääsee katsomaan virtuaalilaseilla kotoa käsin, jolloin konsertteihin osallistumisen onnistuu olematta fyysisesti paikalla. Konserttialueen kamerat on sijoitettu muun muassa eturiviin ja lavalle, mikä tarjoaa katsojalle näkymät sekä yleisön, että artistin näkökulmasta. (Wired, 2017)



Kuva 8. Konsertista avautuva näkymä 360 kameran kautta. (Road to VR, 2016)

Samaan tapaan Inition on luonut virtuaalisen 360° stereoskooppisen audiovisuaalisen klassisen musiikin konserttielämyksen yhdessä Philharmonia Orchestran and Southbank Centren kanssa. Konserttia pääsee seuraamaan niin ikään virtuaalilasien kautta. Konsertin näkymä avautuu orkesterin keskeltä, kapellimestarin paikalta (kuva 9). (Initium, 2016; Philharmonia Orchestra, 2016; HAM, 2018; Arts Professional, 2017)



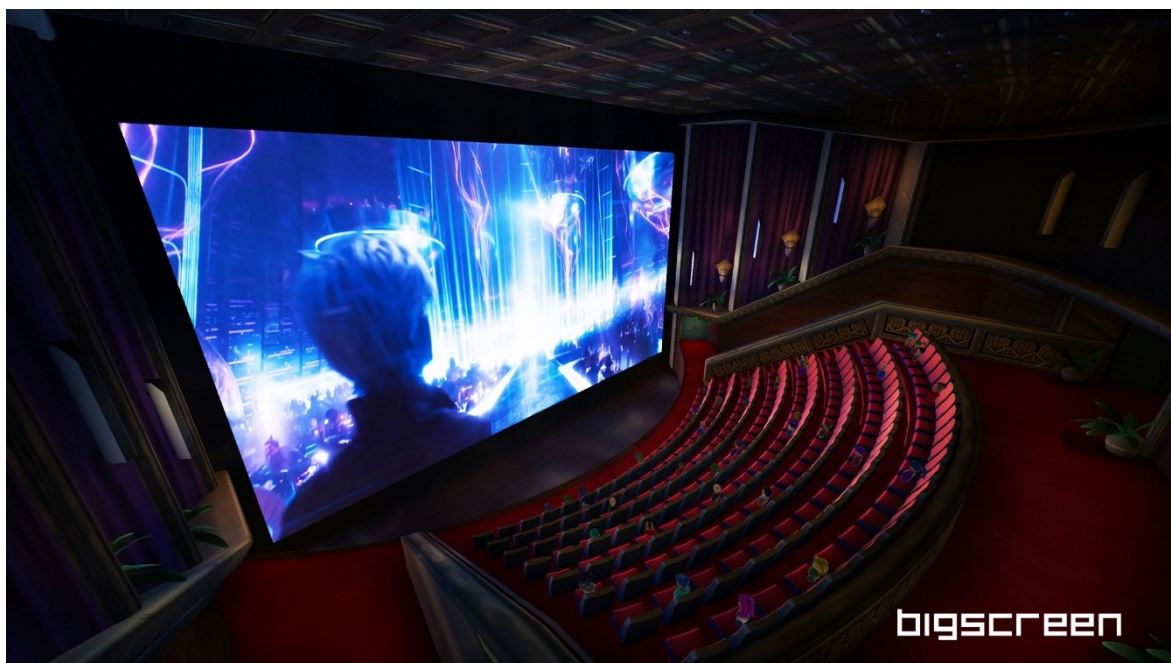
Kuva 9. Konsertin näkymä avautuu lavan keskeltä 360° kameran kautta. (Philharmonia Orchestra, 2016)

2.2.5 Virtuaalielokuvateatteri

Paramount Pictures on kehittänyt täysin virtuaalisen elokuvateatterin, jonka on tarkoitus jäljitellä aitoa elokuvateatterikokemusta virtuaalilasiteknologiaa hyödyntämällä. Aikaisemmista virtuaalielokuvateattereista poiketen teatterilla ei ole fyysistä paikkaa ja osallistuminen onnistuu esimerkiksi kotoa käsin millä tahansa virtuaalilasijärjestelmällä. Visuaalisesti kokemus pyrkii jäljittelemään oikeaa elokuvateatteria auloiineen, valkokankaineen, penkkeineen ja elokuvan alussa esitettävien mainoksineen (kuvat 10 ja 11). Myös yleisö on virtualisoitu ja koostuu muista sovelluksen käyttäjistä. Osallistujilla on myös mahdollisuus keskustella keskenään virtuaaliteatterissa. Virtuaalisen luonteensa vuoksi elokuvakokemukseen on lisäksi helppo tuoda moninaista lisäsisältöä. (Slashfilm, 2017; Bigscreen, 2019a)



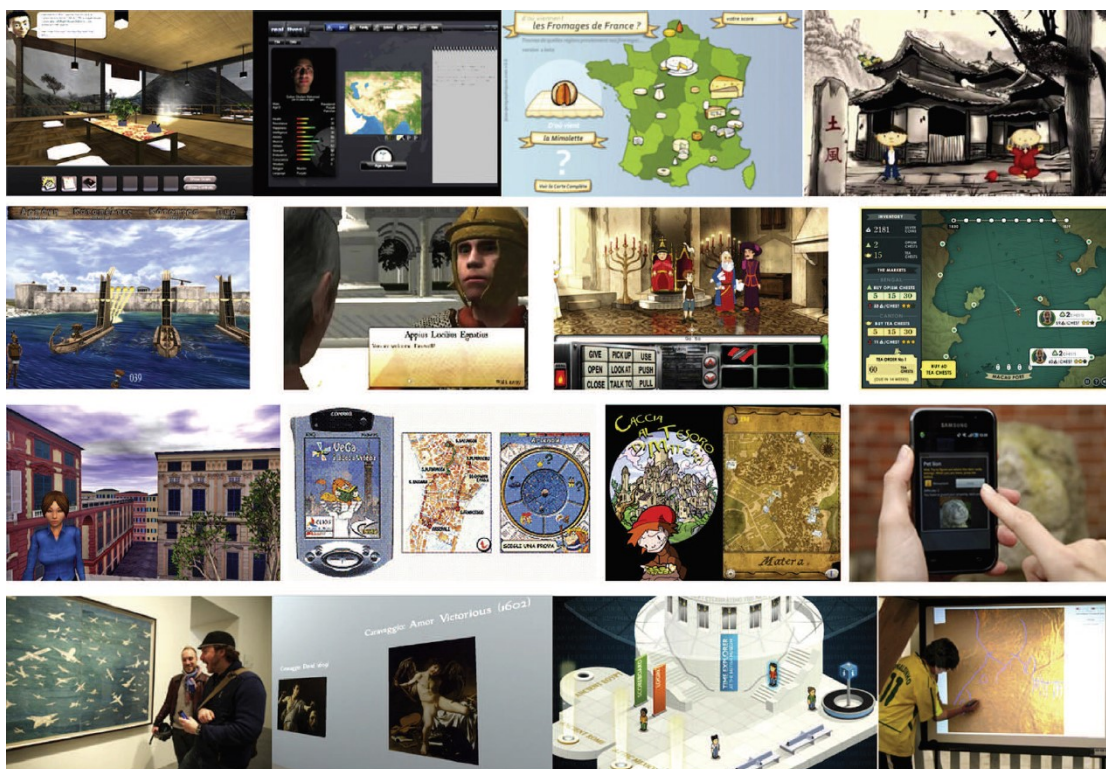
Kuva 10. Virtuaalisen elokuvateatterin aulatila. (Bigscreen, 2019b)



Kuva 11. Virtuaalisen elokuvateatterin näytössali, joka vastaa ilmeeltään oikeaa elokuvateatteria. (Bigscreen, 2019b)

2.3 Pelillistäminen ja peliteknologian hyödyntäminen

Pelillistämistä voi käyttää kulttuurin alalla muun muassa kulttuuriperinnön, opetuksen ja oppimisen sekä museokokemusten tehostamiseksi (Anderson et al., 2010). Kulttuurin alan pelillistämisestä on monia esimerkkejä, joihin muun muassa Mortara et al., 2015 on tehnyt kattavan katsauksen (kuva 12).



Kuva 12. Erilaisia kulttuurin alan pelillistämisesimerkkejä. (Mortara et al., 2015)

Pelimoottoreista on tullut vakiintunein tapa virtuaalisovellusten luomiseen niiden laajan tuen vuoksi, mikä pitää sisällään monimutkaisten 3D-mallien hallinnan, tiedostoformaattien yhteen toimivuuden, renderöinnin, animoinnin ja vuorovaikutuksen. Valitettavasti pelimoottoreiden heikkoutena on niiden käytettävyyden monimutkaisuus, joka muodostaa huomattavan esteen kokemattomille ohjelmoijille. (Bekele et al., 2018) Pelimoottoreita löytyy kuitenkin erilaisille käyttäjille ja erilaisiin käyttötarkoituksiin soveltuvia. (Christopoulou & Xinogalos, 2017) Muun muassa Unreal Engine 4 (Epic Games, 2019) ja Unity 5 (Unity, 2019) ovat hyvin suosittuja pelimoottoreita, joiden avulla on mahdollista tehdä esimerkiksi visuaalisesti näyttäviä laajennetun todellisuuden sovelluksia.

Esimerkkejä laajennetun todellisuuden nykyaikaisista kulttuurin alan sovellutuksista ovat muun muassa 1600-luvun Segebergin kaupungin virtuaalitodellisuusversio (kuva 13) (Deggim et al., 2017) sekä Pedersen et al. (2017) luoma museokokemuksia rikastava lisätyn todellisuuden sovellus TombSeer, jonka avulla voi tarkastella esineitä ja informaatiota, jota muuten ei ole museossa esillä.



Kuva 13. 1600-luvun Segebergin virtuaalitodellisuusversio. (Deggim et al., 2017)

Lisäksi erilaisia virtuaalitodellisuuskokemuksia järjestävä The Void on yksi lähimpänä täydellistä immersiota olevista virtuaalitodellisuuden sovellutuksista. Palvelu tarjoaa useita erilaisia elokuvahenkisiä toiminnallisia virtuaalitodellisuuden kokemuksia paikan päällä koettaviksi. The Void yhdistää virtuaalitodellisuusteknologian sekä haptisen liivin selässä kannettavaan tietokoneeseen, joka mahdollistaa vapaan liikkumisen tiloissa, jotka ovat geometrialtaan ja aistiärsykeiltään suunniteltu vastaamaan virtuaalitodellisuuden ympäristöä (kuva 14). Voimakas immersio syntyy eri aistien stimuloinnin yhteisvaikutuksesta. (The Void, 2019; Road to VR, 2019; Metz, 2015)



Kuva 14. *The Void*, immersiivinen virtuaalitodellisuuskokemus. (*The Void*, 2019)

2.4 3D-mittaus- ja -mallinnusprosessit

2.4.1 Valokuvapohjainen mittaus- ja mallinnusprosessi

Valokuvapohjainen mittaus- ja mallinnusprosessi koostuu tavallisesti kuva-aineiston keruusta ja käsittelystä, fotogrammetrisesta rekonstruktiosta sekä mallin desimoinnista ja teksturoinnista. (Rahaman & Champion, 2019)

2.4.1.1 Kuva-aineiston keruu ja käsittely

Mittaus- ja mallinnusprosessi aloitetaan tyypillisesti mittaamiseen käytettävän kameras valmistelulla. Mittakäyttöön soveltuu nykypäivänä lähes mikä tahansa kamera, joskin suositeltavaa on käyttää korkean resoluution omaavaa täyden kennon kameraa. Valmistelun tarkoituksena on pääosin kameras sisäisen geometrian vakauttaminen ja kuvausasetusten määrittäminen kohteeseen sopivaksi. Kameras sisäinen geometria vakautetaan noudattaen fotogrammetrisen mittaamisen tyypillisiä käytäntöjä. Kuvausformaatiksi on suositeltavaa valita raakakuva (raw), sillä se on kuvanlaadullisesti paras ja pitää sisällään paljon enemmän informaatiota pakattuihin tiedostomuotoihin (esim. jpg) verrattuna, tarjoten paremmat jälkikäsittelymahdollisuudet. Kuvausasetukset määritellään kohteeseen sopiviksi niin, että fotogrammetrisen laskennan kannalta olennaiset kuvanlaadulliset vaatimukset täyttyvät. Kuvia otettaessa on noudatettava järjestelmällisyyttä ja huolellisuutta, sillä kuvien on oltava laadullisesti hyviä mallinnuksen onnistumisen takaamiseksi. Kuvaus suoritetaan yleisesti fotogrammetriseen mittaukseen liittyvien käytäntöjen mukaisesti. Kerätty aineisto tulee tarkastaa ja käsitellä laskentaan sopivaksi ennen fotogrammetristä prosessointia. Käsittelyn pääsääntöisenä tarkoituksena on tasapainottaa kuvien valaistus sekä muuntaa kuvat laskentaan käyttöön sopivaan formaattiin. (Lachambre et al., 2017; Matthews, 2008)

2.4.1.2 Fotogrammetrinen rekonstruktio

Fotogrammetrisen mallin laskenta vaihtelee hieman käytettävästä ohjelmasta riippuen, mutta pitää sisällään tyypillisesti vastinpisteiden etsinnän, kuvien orientoinnin (harva pistepilvi), tiheän pistepilven muodostuksen sekä pintamallin laskennan. Vastinpisteiden etsintä

on nykyisin automaattinen prosessi, jossa fotogrammetrinen ohjelma etsii kuvilta voimakkaita vastinpisteitä. Vastinpisteitä käytetään kuvien orientoinnissa kameroiden sijainnin selvittämiseen ja harvan pistepilven muodostamiseen. Muodostunutta harvaa pistepilveä täydennetään laskemalla tiheä pistepilvi, jolloin kohteesta saadaan yksityiskohtaisempi malli. Tiheän pistepilven pohjalta suoritetaan varsinainen pintamallin muodostus, jolloin kohteesta syntyy jatkuvapintainen 3D-malli. (Julin et al., 2019; Rahaman & Champion, 2019; Rahman et al., 2018) Jotkin fotogrammetriset ohjelmat yhdistelevät eri rekonstruktion vaiheita prosessin yksinkertaistamiseksi. Muun muassa Reality Capturessa vastinpisteiden etsintä ja kuvien orientointi on yhdistetty samaan välivaiheeseen.

2.4.1.3 Mallin desimointi ja teksturointi

Sekä desimointi, että teksturointi tehdään nykypäivänä useimmiten fotogrammetrisilla laskentaohjelmilla, joskin nämä toimenpiteet on mahdollista suorittaa myös muilla 3D-ohjelmilla. Suuren kokonsa vuoksi rekonstruktiossa muodostetut pintamallit ovat desimoitava soveltuakseen käytettäväksi 3D-ohjelmissa (Lachambre et al., 2017). Desimoinnilla pyritään vähentämään mallin kolmioiden/verteksien määrää mahdollisimman paljon ilman mallin geometrian liiallista kärsimistä (Rahaman et al., 2018). Desimoinnin aste on määriteltävä käyttötarkoituksen mukaan, sillä desimointi on aina kompromissi mallin yksityiskohtaisuuden ja koon välillä.

Mallin teksturoinnin tarkoituksena on projisoida mallin luomiseen käytetyt kuvat valmiin pintamallin päälle realistisen ulkomuodon aikaansaamiseksi. Teksturoinnin laatu riippuu muun muassa otettujen kuvien valaistuksesta ja kohteen heijastusominaisuuksista. (Debevec et al., 1998; Remondino, 2011)

2.4.2 Maalaserkeilausaineiston keruu ja käsittely

Laseraineisto kerätään maalaserkeilaimilla noudattaen menetelmälle tyypillistä ohjeistusta (Remondino, 2011). Laseraineiston käsittely pitää sisällään pistepilvien prosessoinnin ja rekisteröinnin sekä viennin soveltuvaan formaattiin. Laseraineiston käsittely tehdään tyypillisesti keilainvalmistajien omilla ohjelmilla, joiden toiminta vaihtelee hieman valmistajasta riippuen. Prosessoinnin ja rekisteröinnin tarkoituksena on pistepilvien värittäminen keilaimen kameran kuvilta sekä yksittäisten keilausten yhdistäminen yhdeksi kohdetta kuvaavaksi pistepilveksi muun muassa icp-algoritmia tai vastinpisteitä apuna käyttäen. Rekisteröintivaiheessa tehdään yleisesti ottaen myös mahdollinen georeferointi. (Remondino, 2011; Vosselman & Maas, 2010) Valmiit pistepilvet muunnetaan valmistajakohtaisesta raakaformaattista laajemmin tuettuihin pistepilviformaatteihin. Pistepilviä tukevat fotogrammetriset laskentaohjelmat, kuten Reality Capture, vaativat niin sanotun ”ordered” formaatin, kuten ptx ja e57, jossa yksittäiset keilaukset ovat erillisiä tiedostoja, mutta niiden keskinäinen orientaatio on tiedossa (Faro, 2019a; Reality Capture, 2019) Pelkästä maalaserkeilausaineistosta tehtävää mallinnusta ei tässä työssä käsitellä, vaan aineistoa hyödynnetään hybridimallinnuksessa yhdessä kuvapohjaisen datan kanssa.

2.4.3 Hybridimittaus- ja mallinnusprosessi

Hybridimittaus- ja mallinnusprosessi perustuu kuva- ja laserpohjaisen aineiston käyttöön. Prosessi koostuu pääpiirteittäin laser- ja kuva-aineiston keruusta ja käsittelystä, aineistojen yhdistämisestä, pintamallin laskennasta sekä mallin desimoinnista ja teksturoinnista. Kuva-aineiston keruu ja käsittely suoritetaan kappaleen 2.4.1 mukaisesti ja maalaseraineiston keruu kappaleen 2.4.2 mukaisesti.

Laser- ja kuvadatan yhdistämiseen on useita eri toimintatapoja. Menetelmän valinta on tapauskohtainen sekä riippuvainen käytössä olevista ohjelmista. Jansa et al. (2004) mukaan yhdistämisen voi tehdä joko orientointivaiheessa tai rekonstruktiovaiheessa. Laser ja kuva-aineistosta voi laskea ensin täysin erilliset mallit ja yhdistää tämän jälkeen 3D-ohjelmilla. Kuvapohjaista aineistoa on myös mahdollista käyttää vain laserpohjaisen mallin teksturointiin. (Guarnieri et al., 2012). Lisäksi fotogrammetrisista laskentaohjelmista muun muassa Reality Capture tukee myös pistepilviä, jolloin laser- ja kuva-aineiston voi yhdistää automaattisesti jo kuvien orientointivaiheessa.

2.4.3.1 Mallin laskenta, desimointi ja teksturointi

Pintamalli lasketaan käyttämällä automaattiseen pintamallin muodostukseen soveltuvia ohjelmia. Laserpistepilviä tukevien fotogrammetristen ohjelmien, kuten Reality Capturen kohdalla, voidaan soveltaa myös kuvapohjaisen menetelmän prosesseja mallin muodostuksessa.

Desimointi ja teksturointi ovat toiminnaltaan kuvapohjaisen menetelmän mukaisia, mutta vaativat eri ohjelmat pelkkään kuvapohjaiseen menetelmään verrattuna. Poikkeuksena ovat laserpistepilviä tukevat fotogrammetriset ohjelmat, joilla desimoinnin ja teksturoinnin voi tehdä kappaleen 2.4.1.3 mukaisesti. Teksturoinnissa huomionarvoista on laserpohjaisen datan yleensä heikompi kuvanlaatu, jonka vuoksi on suositeltavaa käyttää kuvapohjaista aineistoa tekstuurien laskennassa (Jansa et al., 2004).

2.4.4 Syvyyskamerapohjainen mittaus- ja mallinnusprosessi

Syvyyskameroissa käytettävät menetelmät nojaavat tyypillisesti aktiivisen stereon tai kulkuajan perusteella tapahtuvaan syvyystiedon muodostamiseen (Henry et al., 2012). Käytettävä prosessi vaihtelee jonkin verran käytettävästä laitteesta riippuen, joten yksiselitteistä prosessikuvausta on hankala muodostaa. Syvyyskameroilla on kuitenkin tiettyjä ominaisuuksia, jotka soveltuvat laitteesta riippumatta. Pääpiirteittäin syvyyskamerapohjainen mittaus- ja mallinnusprosessi sisältää aineiston keruun, pintamallin muodostamisen sekä mallin editointivaiheet.

2.4.4.1 Aineiston keruu

Aineiston keruu on laitekohtaista, jonka vuoksi mittausten tekemiseen on sovellettava laitteen valmistajan antamia ohjeita. Menetelmälle yhteisiä piirteitä ja rajoitteita ovat kuitenkin lyhyt, tyypillisesti alle 5 metrin mittausetäisyys, kapea näkökenttä ja kohinainen mittausdata. (Henry et al., 2012). Näiden ominaisuuksien takia menetelmää ei suositella suurten kohteiden mittaamiseen. Menetelmä soveltuu kehnosti myös ulkotilojen mittaamiseen, sillä aurin gon infrapunasäteily häiritsee laitteen infrapunasensorin toimintaa (Virtanen et al., 2018). Syvyyskamerat ovat joka tapauksessa usein hyvin pitkälle automatisoituja ja tuottavat tyypillisesti väritettyjä pistepilviä.

2.4.4.2 Pintamallin laskenta

Syvyyskameran tuottamasta pistepilvestä on muodostettava pintamalli ja laskettava tekstuurit, mikä tapahtuu jokseenkin samalla tavalla kuin laserpohjaisen aineiston (kappale 2.4.2.3) osalta. Joillain valmistajilla, kuten Matterportilla, on oma pilvipohjainen laskentapalvelu, joka tuottaa automaattisesti myös teksturoidun pintamallin.

2.4.5 Päällemallinnus

Reaaliaikaisia sovelluksia tuottaessa mallien kokojen tulee olla tarpeeksi pieniä, jonka vuoksi etenkin kooltaan suuria ja monimutkaisia pintamalleja joutuu editoimaan 3D-ohjelmilla. Desimoinnista poiketen päällemallinnus on manuaalinen toimenpide, jossa pintamallin muotoja mukaillen muodostetaan geometrialtaan hyvin yksinkertaistettu, mutta yksityiskohtainen versio mallista. Lisäksi tarkoituksena on mitta-aineistoon jääneiden aukkojen täyttäminen ja muiden virheiden korjaaminen. Tuloksena syntyvät mallit ovat kooltaan huomattavasti kooltaan pienempiä kuin lasketut ja desimoidut mallit. Malleille määritellään myös niin sanotut UV-kartat, joiden avulla alkuperäisen mallin tekstuurikartat sovitetaan kevennetyn version päälle. UV-karttoja voidaan hyödyntää lisäksi myös muihin karttoihin, kuten normaalikarttoihin, joilla mallin visuaalista ilmettä on mahdollista kohentaa ja manipuloida koskematta mallin geometriaan. (Lachambre et al., 2017; Turppa et al., 2014)

2.4.6 Mallien vienti pelimoottoreihin

Valmiiden desimoitujen ja päällemallintamalla tuotettujen mallien tuominen pelimoottoreihin tapahtuu pelimoottorikohtaisesti mittaus- ja mallinnusmenetelmästä riippumatta. Tuotavien mallien ja tekstuurien on oltava pelimoottorin tukemissa formaateissa, kuten Unreal Engine 4:n tukemassa fbx-formaatissa. Lisäksi mallien on oltava kooltaan tarpeeksi kevyitä reaaliaikaista renderöintiä varten. Tuonnin jälkeen mallit voi asetella halutulla tavalla sekä määritellä mallien materiaalit ja valaistus (Sheng et al., 2015). Lisäksi malleja voi visualisoida esimerkiksi taivasta jäljittelevien ”skyboxien” ja erikoistehosteiden avulla sekä tuottaa ympäristöjä, joissa voi kulkea vapaasti ympäriinsä (Oikarinen, 2016).

3 Menetelmät

Tässä luvussa käydään yksityiskohtaisesti läpi kolmen eri kohteen; Dipolin, Kansallismuseon esineiden sekä Suomenlinnan vankityrmien mittaus- ja mallinnusprosessit sekä niissä hyödynnetyt laitteet ja ohjelmistot. Kohteiden mittaus- ja mallinnusprosessit on toteutettu useamman henkilön yhteistyönä, jonka vuoksi osallistuneiden henkilöiden käyttämät menetelmät on selvitetty kattavan prosessikuvauksen luomiseksi. Alla olevassa taulukossa 1 on esitelty eri kohteissa käytetyt ohjelmat ja laitteet.

Ohjelmistot:	Dipoli	Kansallismuseon esineet	Suomenlinnan vankityrmit
Faro Scene	X		X
Reality Capture	X		X
Agisoft Photoscan		X	
Autodesk 3DsMax	X		X
RizomUV Virtual Spaces	X		
Adobe Photoshop			X
Adobe Photoshop Lightroom CC	X	X	X
Unity 5			X
Unreal Engine 4	X	X	X
Laitteet:			
Faro Focus ^{3D} S120	X		X
Faro Focus S350	X		X
Nikon D800E	X	X	X
Nikon D810	X		X
Sony RX1RM2	X		
DJI Phantom 4 Pro+	X		
Matterport Pro2 3D			X
GeoSLAM ZebRevo RT			X
HTC Vive Pro	X	X	X

Taulukko 1. Eri kohteissa käytetyt ohjelmat ja laitteet.

3.1 Käytettävät ohjelmistot

Tässä osiossa esitellään esimerkkitapauksissa käytetyt ohjelmistot.

Faro Scene (ohjelmistoversio 6.0.2.23)

Faro Scene on Faron laserkeilainten tuottaman pistepilvidatan käsittelyohjelma. Ohjelmalla voidaan muun muassa prosessoida, rekisteröidä ja siivota pistepilviä, sekä viedä pistepilvet sopivaan tiedostoformaattiin jatkokäsittelyä varten. (Faro, 2017) Ohjelmaa käytettiin työssä Faron laserkeilaimilla tuotettujen pistepilvien prosessointiin, rekisteröintiin ja siivoamiseen.

Reality Capture (ohjelmistoversio 1.0.3.6310)

Reality Capture on fotogrammetrinen laskentaohjelma, joka pystyy hyödyntämään myös laserkeilaamalla tuotettua pistepilviaineistoa. Laseraineistojen tulee kuitenkin olla niin sanotussa ”ordered” formaatissa, kuten ptx tai e57, jossa yksittäisten keilausasemien paikka tiedetään. Ohjelma pystyy hoitamaan muun muassa kuvien orientointiin, pistepilven laskennan, mesh-mallinnuksen ja teksturoinnin. Ohjelmassa on myös monia pistepilven ja mesh-

mallin editointityökaluja, joilla malleja voi muokata haluamukseen. Valmiin mallin vienti onnistuu tyypillisimpiin 3D-mallinnuksessa käytettäviin tiedostoformaatteihin, kuten obj ja fbx. (Reality Capture, 2019) Ohjelmaa hyödynnettiin tutkimuksessa laser- ja kuvadatan yhdistämiseen, fotogrammetriseen rekonstruktioon sekä mallien desimointiin ja teksturointiin.

Agisoft Photoscan (2018)

Photoscan (nykyisin Metashape) on niin ikään fotogrammetrinen laskentaohjelma, jolla voi tuottaa desimoituja ja teksturoituja 3D-malleja kuvista. (Agisoft, 2019) Ohjelmaa hyödynnettiin fotogrammetristen mallien laskentaan, desimointiin ja teksturointiin kuvapohjaisen datan pohjalta.

Autodesk 3DsMax (Ohjelmistoversio 2018, 20.0 - 20.0.0.966)

3DsMax on 3D-mallinnukseen, animointiin, renderöintiin ja visualisointiin tarkoitettu ohjelma. (Autodesk, 2019) Ohjelmaa käytettiin työn päällemallinnusvaiheisiin sekä UV-kartoitukseen.

RizomUV Virtual Spaces (2018)

RizomUV Virtual Spaces on UV-kartoitusohjelma, josta löytyy kaikki tarvittavat työkalut ja ominaisuudet suurten ja monimutkaisten mallien ”unwrappaamiseksi”. (Rizom, 2019) Ohjelmaa hyödynnettiin tutkimuksessa monimutkaisten kohteiden UV-kartoitukseen.

Adobe Photoshop (2018)

Photoshop on kuvankäsittelyyn ja graafiseen suunnitteluun tarkoitettu ohjelma. (Adobe, 2019a) Tässä työssä ohjelmaa käytettiin tekstuurikuvien virheiden korjaamiseen ja muiden epätoivottujen asioiden poistoon.

Adobe Photoshop Lightroom CC (Ohjelmistoversio 2015.7)

Adobe Photoshop Lightroom CC on valokuvien muokkaamiseen tarkoitettu ohjelma, jolla voi korjata kuvien ominaisuuksia, kuten valaistusta. Ohjelmalla saa myös muunnettua raakakuvat haluttuun kuvaformaattiin jatkokäyttöä varten. (Adobe, 2019b) Ohjelmalla suoritettiin kuva-aineistojen valaistuksen korjaaminen sekä formaattimuunnokset raakaformaattista jpg-formaattiin.

Unity 5

Unity 5 on vapaan lähdekoodin pelimoottori, josta on olemassa sekä ilmainen että maksulliset versiot käyttötarkoituksesta riippuen. (Unity, 2019) Pelimoottoria hyödynnettiin Suomenlinnan vankityrmistä tuotetun Matterport-mallin visualisointiin.

Unreal Engine 4 (Ohjelmistoversio 4.21-4.22)

Unreal Engine 4 on Epic Gamesin tuottama pelimoottori, joka on ilmainen siihen asti kunnes sen avulla tuotetuilla sovelluksilla alkaa tekemään merkittävää voittoa. (Epic Games, 2019) Pelimoottoria hyödynnettiin Dipolista, Kansallismuseon esineistä sekä Suomenlinnan vankityrmistä tuotettujen mallien visualisointiin.

3.2 Käytettävät laitteet

Tässä osiossa esitellään esimerkkitapauksissa käytetyt laitteet.

3.2.1 Faro Focus^{3D} S120 -laserkeilain

Faro Focus^{3D} S120 -laserkeilain (kuva 15) on nopea ja tarkka monimuotoisten sisä- ja ulko-ympäristöjen yksityiskohtaisen 3D-geometrian taltiointiin suunniteltu laite. Laite käyttää mittaamiseen vaihe-eropohjaista 905 nanometrin lähi-infrapunalaseria, jonka takia se on luokiteltu luokan 3R laserjärjestelmäksi. Laitteen näkökenttä on 360° horisontaalisesti ja 300° vertikaalisesti, mikä tuottaa lähes pallon muotoisen näkymän. Maksimitoimintaetäisyydeksi laitteelle on annettu 120 metriä ja pistehavaintovirheeksi ± 2 millimetriä 10 metrin matkalla. Laitteen käyttämä keilausaika määräytyy käytettävien tarkkuusasetusten, kuten pistetiheyden ja toistojen määrän mukaisesti, ja vaihtelee muutamasta minuutista aina pariin tuntiin asti. Parhaimmillaan keilain pystyy mittaamaan 976 000 pistettä sekunnissa. Lopulliset 3D-havaintopisteet lasketaan laitteen ja peilin kiertokulmien sekä etäisyyshavaintojen perusteella. Lisäksi laite sisältää rgb-kameran sekä määrittää kohteen heijastuksen intensiteettiä, joiden avulla mitattu pistepilvi voidaan visualisoida realistisin värein tai harmaasävyinä intensiteetin mukaisesti. (Faro, 2012; Faro, 2013)

3.2.2 Faro Focus S350 -laserkeilain

Faro Focus S350 -laserkeilain (kuva 15) on toiminnallisesti hyvin samankaltainen kuin Faro Focus^{3D} S120. Laite käyttää Faro Focus^{3D} S120 -keilaimesta poiketen 1550 nanometrin aallonpituudella toimivaa laseria ja se on luokiteltu luokan 1 laserjärjestelmäksi, ollen täysin silmäturvallinen. Lisäksi laitteen maksimitoimintaetäisyys on 350 metriä ja sillä on mahdollista tuottaa HDR-kuvia. Muilta teknisiltä osiltaan Faro Focus S350 on identtinen Faro Focus^{3D} S120 -keilaimen kanssa. (Faro, 2018)



Kuva 15. Vasemmalla Faro Focus^{3D} S120 -laserkeilain ja oikealla Faro Focus S350 -laserkeilain (Faro, 2019b).

3.2.3 Kamerajärjestelmät

Mittauksissa käytettiin Nikonin D800E- ja D810 -järjestelmäkameroita, Sonyn RX1RM2 -järjestelmäkameraa sekä DJI Phantom 4 Pro+ kuvauskohterin sisältämää kameraa (kuva 16). Kameroiden tekniset ominaisuudet on esitelty taulukossa 2.



Kuva 16. Kuvassa Nikon D800E -järjestelmäkamera (vasen yläkulma), Nikon D810 -järjestelmäkamera (oikea yläkulma), Sony RX1RM2 -järjestelmäkamera (vasen alakulma) ja DJI Phantom 4 Pro + -kuvauskooperi (oikea alakulma) (Nikon, 2019a; Nikon, 2019b; Sony, 2019; B&H, 2019).

	Nikon D800E	Nikon D810	Sony RX1RM2	DJI Phantom 4 Pro+
Sensorityyppi	CMOS	CMOS	BSI-CMOS	CMOS
Sensorin koko	24 x 35,9 mm (full frame)	24 x 35,9 mm (full frame)	24 x 35,9 mm (full frame)	13,2 x 8,8 mm
Pikselit	36M	36M	42M	20M
Resoluutio	7360 x 4912	7360 x 4912	7952 x 5304	5472 x 3648
Nopein suljinaika	1/8000s	1/8000s	1/4000s	1/8000s
Hitain suljinaika	30s	30s	30s	8s
ISO	50 – 25600	32 – 51200	50 – 102400	100 – 12800
Kuvan vakautus	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Kuvaformaatti	JPEG, RAW (NEF), TIFF	JPEG, RAW (NEF)	JPEG, RAW (ARW)	JPEG, RAW (DNG)

Taulukko 2. Kameroiden tekniset ominaisuudet.

3.2.4 Matterport Pro2 3D

Matterport Pro2 3D (kuva 17) on pitkälle tuotteistettu strukturoituun valoon perustuva mallinnusjärjestelmä, jonka ensisijainen käyttötarkoitus on ollut kolmiulotteisten sisätilamallien ja panoraamakuvien tuottaminen esimerkiksi kiinteistönvälittäjien käyttöön. Matterport Pro2 3D omaa kolme erilaista kamerasensoria, rgb-kameran, infrapunapohjaisen syvyyskameran sekä lämpökameran. Laite omaa strukturoidun valon laitteille ominaiset ongelmat, kuten lyhyen mittausetäisyyden ja rajallisen toimintakyvyn ulko-olosuhteissa. Huomioitavaa on myös Matterportin tuottaman mallin geometrisen laadun heikentyminen keilausten määrän kasvaessa (Virtanen et al., 2018), mikä on ongelma erityisesti laajemmissa mittauskohteissa.

Laitetta käytetään tabletilla toimivan mittausohjelmiston kautta, jonka avulla voi tehdä mitauksia, seurata mittauksen edistymistä sekä suunnitella mittauspaikkojen sijaintia. Laitteen mittausaika yhtä mittausasemaa kohden on noin 20 sekuntia.

Matterportilla tuotettu mittausdata käsitellään tuotteen omassa pilvipalvelussa, josta se on käsittelyn jälkeen ladattavissa korvausta vastaan. Ladattava datapaketti (MatterPak™) pitää sisällään varsinaisen 3D-meshin (obj), väritetyn pistepilven (xyz) sekä pohjapiirrokset mitausalueesta. Tämän lisäksi on myös mahdollista ladata 360°-kuvia. (Matterport, 2019a; Matterport, 2019b; Matterport, 2019c)



Kuva 17. Matterport Pro2 3D (Matterport, 2019d)

3.2.5 GeoSLAM Zeb Revo RT

Geoslam Zeb Revo RT (kuva 18) on käsikäyttöinen SLAM algoritmiin perustuva pulssipohjainen (ToF) laserkeilain. Se soveltuu erityisesti monimutkaisten ja suljettujen tilojen mittaamiseen. Laite mahdollistaa reaaliaikaisen mittauksen seurannan ja prosessoinnin skannauksen aikana. Laitteen mittaustäisyydeksi on ilmoitettu noin 30 metriä ja se tuottaa 43 200 pistettä sekunnissa. Suhteellinen mittaustarkkuus on 1-3 senttimetriä. (GeoSLAM, 2019a; GeoSLAM, 2019b)



Kuva 18. Zeb Revo RT -käsikeilain. (GeoSLAM, 2019a; GeoSLAM, 2019b)

3.2.6 HTC Vive Pro -virtuaalitodellisuusjärjestelmä

Vive Pro on HTC:n valmistama virtuaalitodellisuusjärjestelmä (kuva 19), joka koostuu kuulokkeellisista virtuaalilaseista, seurantamajakoista ja ohjaimista. Lasien silmäkohtainen resoluutio on 1440 x 1600 pikseliä ja näkökenttä on 110°. Järjestelmä käyttää seurantamajakoita lasien sijainnin seurantaan, mikä mahdollistaa noin seitsemän neliömetrin kokoisen pelialueen. Järjestelmään kuuluvilla ohjaimilla navigoidaan sovelluksissa ja virtuaalitodellisuudessa.



Kuva 19. HTC Vive Pro -virtuaalilasejärjestelmä.

3.3 Esimerkkitapaus 1: Dipoli

Dipoli on Aalto-yliopiston päärakennus ja moninaisten tapahtumien järjestämispaikka. Rakennus on suuri ja epäsäännöllisen muotoinen ja sen pääovien edessä on mekaaninen muuttaman metrin korkea käpytaideteos. Dipolia koskevaa aineistoa kerättiin useaan eri ajankohtaan, käyttäen monia eri mittalaitteita. Kerääminen aloitettiin vuoden 2017 kesällä tehdyillä maalaserkeilauksilla, jonka jälkeen reilun vuoden sisällä kohteesta otettiin myös valokuvat sekä maasta, että ilmasta.

3.3.1 Laseraineiston kerääminen ja käsittely

Laseraineiston keruu suoritettiin käyttämällä Faro Focus^{3D} S120 -maalaserkeilainta. Keilauksia tehtiin yhteensä 45 kappaletta ja keilausten välillä oli noin 10-15 metrin siirtymät. Keilaimen resoluutiona käytettiin kohteen muodosta ja mittausetäisyyksistä riippuen 6 millimetrin (pitkät etäisyydet) tai 12 millimetrin (lyhyet etäisyydet) pistetiheyttä kymmentä metriä kohden. Sama piste mitattiin kaksinkertaisella toistolla, jonka avulla pyrittiin ehkäisemään mittausten sisältämää kohinaa ja pitämään mittausaika siedettävänä. Yksittäiseen keilaukseen kului aikaa noin kuusi minuuttia (6 millimetrin resoluutiolla) ja neljä ja puoli minuuttia (12 millimetrin resoluutiolla).

Kerätyn laseraineiston käsittely suoritettiin Faro Scene -ohjelmalla. Ohjelman avulla datalle tehtiin automaattinen prosessointi ja rekisteröinti. Automaattinen rekisteröinti ei kuitenkaan onnistunut liittämään kaikkia keilauksia toisiinsa, jonka vuoksi aineisto oli rekisteröitävä manuaalisesti loppuun. Manuaalinen rekisteröinti tehtiin ohjelman rekisteröintityökaluilla, osoittamalla vastinpisteitä ja vastinpintoja vierekkäisiltä keilauksilta. Lopputuloksena syntyi tiheä keskenään orientoitu väritetty pistepilvi.

Pistepilvi siivottiin virheellisten havaintojen ja turhien pisteiden osalta. Esimerkiksi kaikki Dipolin sisältä ikkunoiden kautta tulleet havainnot ja ihmisten liikehännästä aiheutuneet havainnot poistettiin. Lisäksi kaikki aineistossa esiintyvät puut ja korkeampi kasvillisuus poistettiin. Siivottu pistepilvi vietiin yksittäisinä värillisinä keilauksina ptx-formaattiin ja laserpistepilviaineiston kooksi muodostui lopulta yhteensä noin 65 gigatavua.

3.3.2 Kuva-aineiston kerääminen ja käsittely

Kuva-aineisto kerättiin käyttäen Nikonin D800E- ja D810 -järjestelmäkameroita sekä DJI Phantom 4 Pro+ ja Sonyn RX1RM2 -järjestelmäkameralla varustettua GeoDrone X4L -kuvausdronea. Nikonin järjestelmäkameroilla otettiin kuvia maasta käsin, kiertäen koko Dipolin ympäri. Kummassakin kamerassa käytettiin Nikkorin 14-24 millimetrin laajakulmalinssiä. Kuvaushetkellä sää oli puolipilvinen ja valoisa, joten kuvat otettiin käsivaralta käyttäen aukkoautomaatiikkaa. Kuvausasetuksina käytettiin aukkoa F8 ja ISO arvoa 800, joilla taattiin riittävä valotus, hyvä syväterävyys ja matalahko kohinan määrä. Joitakin kuvaamatta jääneitä kohteita, kuten Dipolin käpyä, käytiin kuvaamassa jälkeinpäin, käyttäen samoja kameroita ja asetuksia. Maasta otettiin kuvia kaiken kaikkiaan noin 2500 kappaleen edestä.

DJI Phantom 4 Pro+ -kuvausdronella taltioitiin pääsääntöisesti rakennuksen kattorakenteita sekä joitain muita korkealla olevia, maakuvilta huonosti näkyviä kohteita. Kuvat otettiin manuaalisesti, pysähtyen jokaisen kuvanoton aikana paikalleen, sillä kyseiseen dronemalliin ei ollut mahdollista asentaa lentosuunnitteluohjelmaa. DJI:n dronella otettiin sekä nadiiri että viistokuvia, jotta myös rakennuksen seinät ovat näkyvillä aineistojen yhdistämistä varten. DJI:n dronella käytiin kuvaamassa useampana päivänä ja kuvausolosuhteet vaihtelivat täysin pilvisestä aurinkoiseen. Yhteensä DJI:llä otettiin kuvia reilu 800 kappaletta.

Sonyn RX1RM2 -järjestelmäkameralla varustettua GeoDrone X4L -kuvausdronea käytettiin lähinnä laadukkaiden nadiirikuvien ottamiseen kohteesta sekä sen lähiympäristöstä. Kuvaus tehtiin liikkeestä, lentosuunnitteluohjelmalla määritellyjä lentolinjoja mukaillen. Kameran kuvat otettiin suljinaika-automaatiikkaa käyttäen 1/1000 sekunnin suljinaikaa, jolloin kuvat pysyivät tarkkoina dronen liikkuesssa. Lyhyen suljinajan takia, kameran aukko pysyi pääasiassa kokonaan auki (tässä tapauksessa F2), riittävän valaistuksen takaamiseksi. Kuvamäärä oli tässä tapauksessa reilut 100 kappaletta.

Hankittu kuva-aineisto käsiteltiin Adobe Photoshop Lightroom CC -ohjelmalla. Tarkoituksena oli normalisoida kuvien väliset valaistuserot, jotka vaikuttavat negatiivisesti fotogrammetriseen mallinnukseen. Eri aikoina tehtyjen kuvausten, eri kuvaussensoreiden sekä vaihtelevien kuvausolosuhteiden takia valaistuksen normalisointi osoittautui vaikeaksi tehtäväksi koko aineiston osalta. Valaistuksen ja muiden korjausten jälkeen kuvat muunnettiin jpg-formaattiin.

3.3.3 Laser- ja kuva-aineistojen yhdistäminen ja orientointi

Käsiteltyt aineistot tuotiin fotogrammetrista laskentaa varten Reality Captureen. Ohjelma tukee myös laserkeilaimella tuotettua aineistoa, yhden keilauksen vastatessa kuutta kuvaa. Kaiken kaikkiaan kuva- ja laseraineistoa oli 3697 kuvan edestä. Ohjelman lisenssi tukee kuitenkin vain 2500 kuvan käyttöä mallin muodostamisessa, joten osa aineistosta oli jätettävä pois. Mukaan otettavat kuvat valittiin niiden olennaisuuden ja laadun perusteella. Esimerkiksi selkeistä valotusongelmista kärsivät kuvat ja samaa kohtaa turhan toistuvasti esittävät kuvat poistettiin. Lopulliset sensorikohtaiset kuvamäärät olivat seuraavan taulukon mukaiset:

	D800E	D810	DJI	RX1RM2	Faro Focus ^{3D}	Yhteensä
Kuvamäärä	1658	846	830	124	239	3697
Käytetyt kuvat	1064	768	336	93	239	2500

Taulukko 3. Kuvamäärät

Aineisto pyrittiin orientoimaan ohjelman automaattista ”Align Images” -toimintoa käyttäen. Orientointi onnistui koko datan osalta vain osittain ja tuloksena muodostui useita eri komponentteja, jotka käsittivät muun muassa katon ja useamman kohdan rakennuksen seinää. Myös osa laserkeilatusta aineistosta muodosti oman komponenttinsa, eikä yhdistynyt suoraan kuva-aineistoon. Osittain onnistuneen automaattisen orientoinnin seurauksena komponenttien keskinäinen rekisteröinti oli tehtävä manuaalisesti. Manuaalinen rekisteröinti tehtiin käyttämällä Reality Capturen ”Control Points” -toimintoa, jonka avulla aineistojen välille osoitetaan vastinpisteitä. Sopivien vastinpisteiden löydyttyä komponentit pyrittiin orientoimaan uudelleen. Erityisen hankalaksi osoittautui kattokomponentin yhdistäminen muuhun rakennukseen, sillä tarpeeksi yksiselitteisiä vastinpisteitä oli vaikea löytää ilma- ja maakuvienväliltä. Kaiken kaikkiaan vastinpisteitä muodostui 41 kappaletta ja ne sijoittuvat pääosin Dipolin eteläpuoleiselle sivulle (kuva 20).

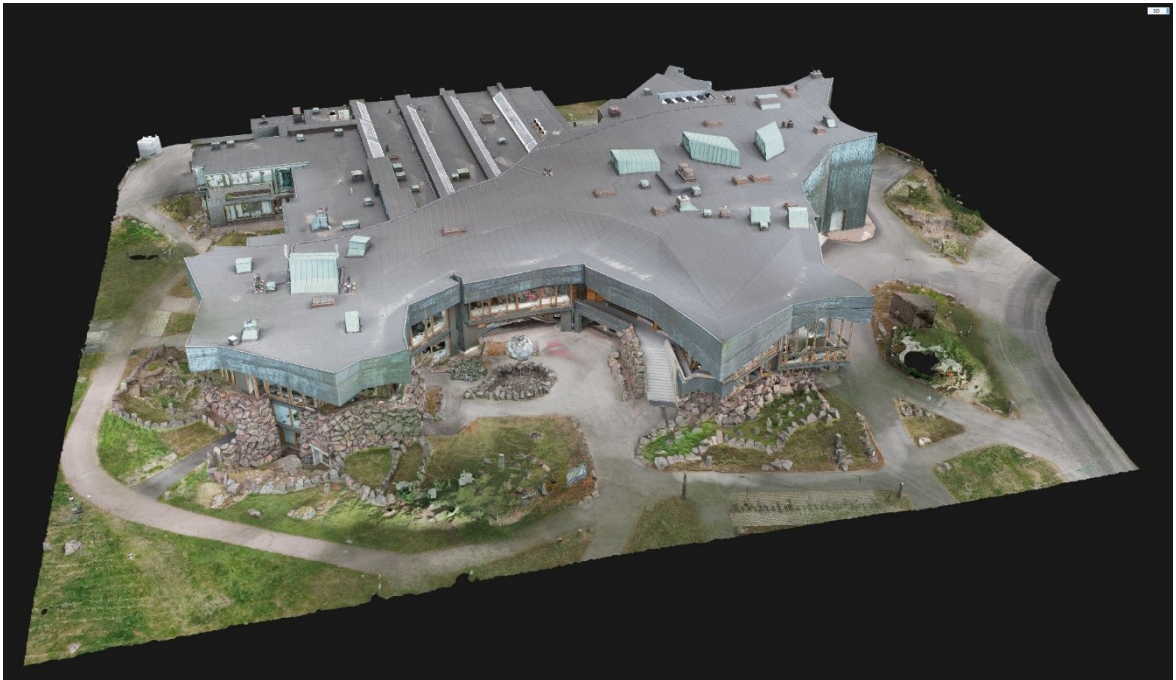


Kuva 20. Yhdistämiseen käytettyjen vastin pisteiden sijainnit.

3.3.4 Mallin muodostaminen ja teksturointi

Kohteen pintamalli laskettiin niin ikään Reality Capturella, käyttäen automaattista korkean yksityiskohtaisuuden rekonstruktiota ("High detail"). Suuren kuvamäärän ja korkeiden asetusten vuoksi pintamallin laskenta kesti noin yhden kokonaisen viikon verran tehokonetta käyttäen. Lopputuloksena syntyi pintamalli, jonka kolmiomäärä oli hieman yli kolme miljardia. Massiivisen kolmiomääränsä vuoksi mallia oli kevennettävä automaattisin desimointikeinoin huomattavasti ennen manuaalisen päälle mallinnuksen suorittamista. Desimointiin käytettiin Reality Capturen omaa desimointityökalua, jolla alkuperäinen noin kolmen miljardin kolmion pintamalli kevennettiin noin 8 miljoonaan kolmioon/4 miljoonaan verteksiin. Automaattisen desimoinnin lisäksi mallista poistettiin manuaalisesti puut ja korkeampi kasvillisuus. Lisäksi pelkistä puista ja kasvillisuudesta tehtiin oma desimoitu mallinsa. Desimoinnin jälkeen Reality Capturella laskettiin desimoidulle mallille tekstuurit, käyttäen ainoastaan kuvapohjaista aineistoa laskennassa laserkeilausaineston kuvien heikon laadun takia. Teksturoinnin resoluutioksi valittiin 4096 x 4096 pikseliä ja ohjelman annettiin muodostaa tarvitsemansa määrä tekstuurikarttoja. Yhteensä teksturoinnin tuloksena syntyi 61

tekstuurikarttaa. Desimoitu ja teksturoitu malli (kuva 21), sekä pelkistä puista ja kasvillisuudesta tehty teksturoimaton malli vietiin fbx-formaattiin päällemallinnusta varten.



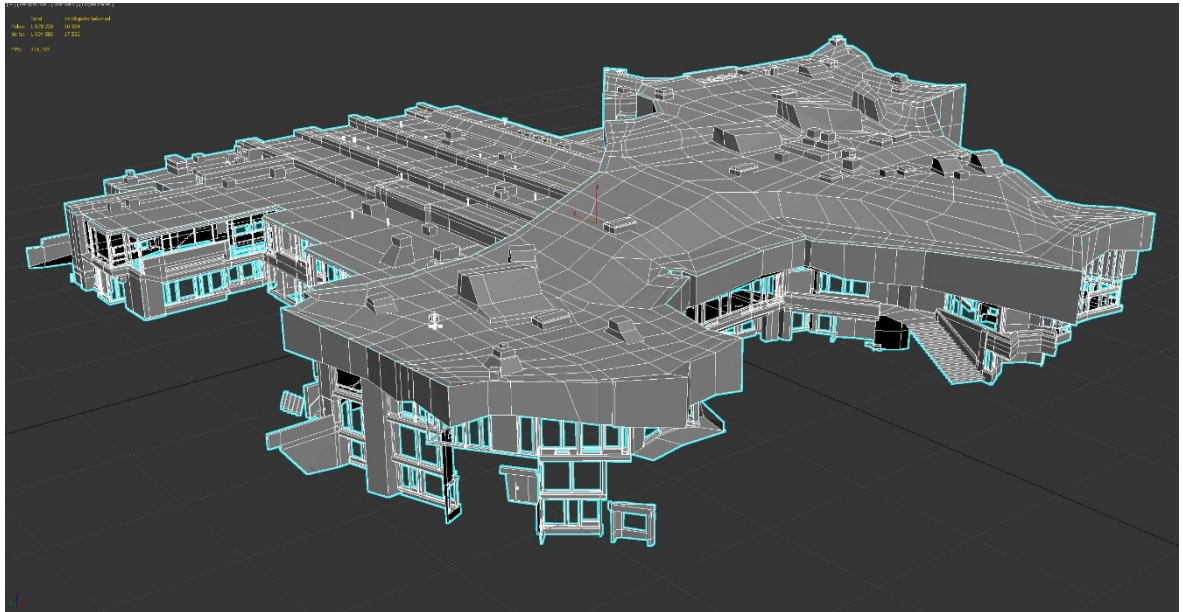
Kuva 21. Reality Capturella tuotettu puuton desimoitu ja teksturoitu malli.

3.3.5 Päällemallinnusprosessi

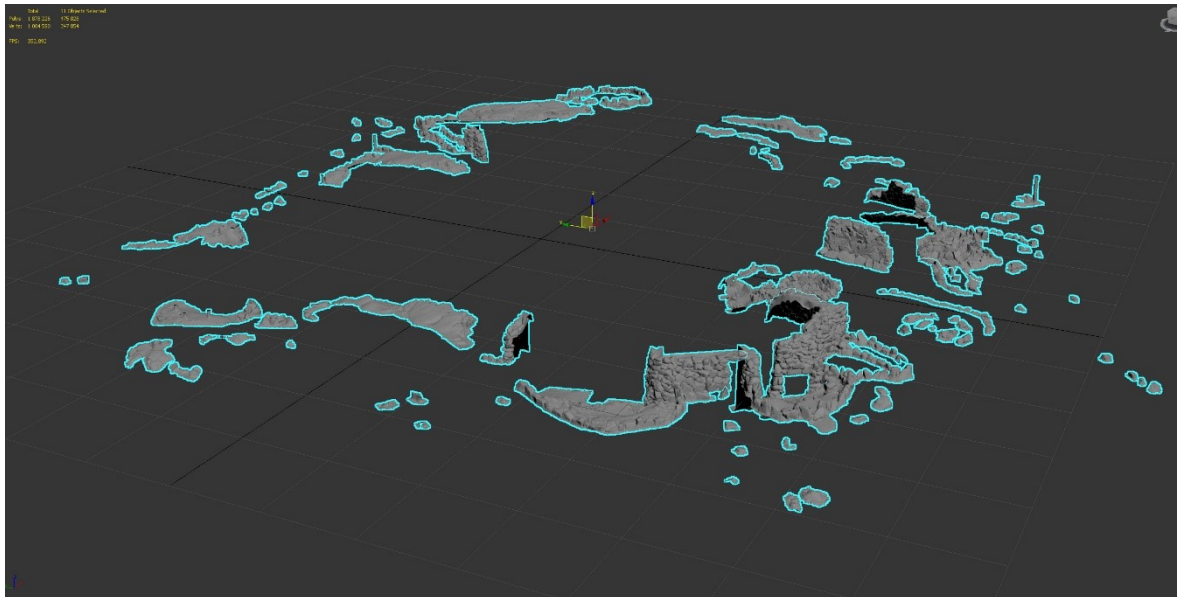
Päällemallinnus toteutettiin Autodeskin 3DsMax -ohjelmalla. Mallinnus tehtiin Reality Capturella laskettua puutonta mallia mukaillen polygonimallinnusmenetelmiä ja retopolointityökaluja käyttäen. Varsinainen rakennus (kuva 22), ikkunat, kivet (kuva 23) ja käpy mallinnettiin eri osissa. Kivien monimutkaisuuden ja määrän vuoksi ne vievät suurimman osan kokonaisverteksimäärästä. Tuloksena syntyneen mallin verteksimäärät olivat seuraavan taulukon 4 mukaiset:

	Rakennus	Ikkunat	Kivet	Käpy	Yhteensä
Verteksimäärä, kpl	7342	668	247854	13746	269610

Taulukko 4. Verteksimäärät.

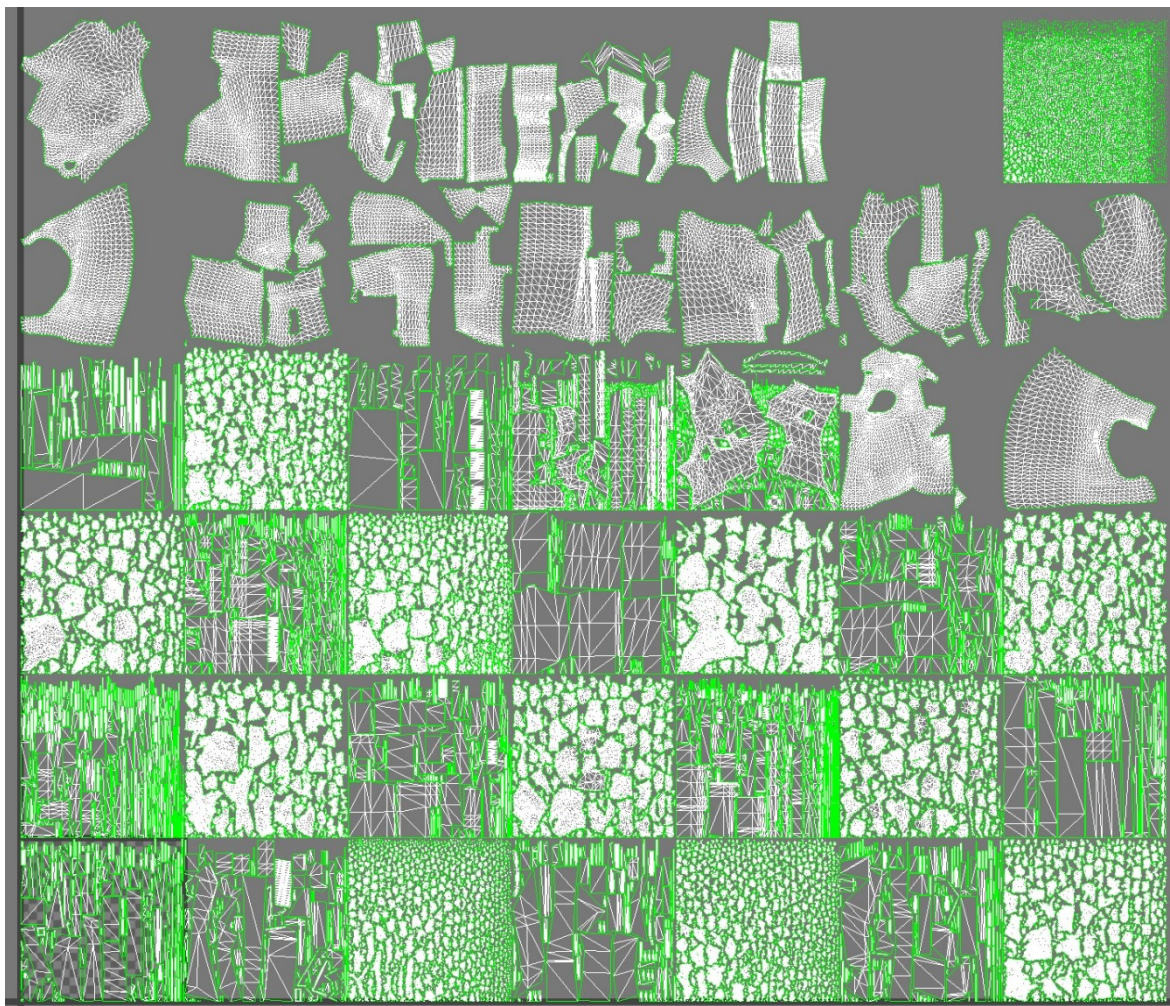


Kuva 22. Pelkän rakennuksen päällemallinnos.



Kuva 23. Rakennusta ympäröivien kivien päällemallinnos.

Päällemallinnettuun malliin lisättiin puiden ja kasvillisuuden käsittävä desimoitu malli, jotta ”unwrappauksen” tuloksena syntyvät UV-kartat muodostuvat oikein myöhemmin tehtävää tekstuurien uudelleenprojisointia varten. ”Unwrappaus” suoritettiin Rizom: Unfold 3D Virtual Spaces -ohjelmalla, joka käsittelee monimutkaista geometriaa paremmin 3DsMaxiin verrattuna. Lopputuloksena syntyi 42 tekstuurikarttaa (kuva 24), joista jätettiin pois yksi puut sisältävä tekstuurikartta.



Kuva 24. Luodut UV-kartat.

”Unwrappauksen” jälkeen malli tuotiin takaisin Reality Captureen ohjelman ”Texture Reprojection” -toiminnolla tehtävää tekstuurien uudelleenprojisointia varten. Uudelleenprojisoinnin avulla tiheämmän Reality Capturella lasketun mallin tekstuurit liitettiin päällemaalattuun malliin (kuva 25) käyttäen hyväksi Rizomilla muodostettuja UV-karttoja. Teksturoinnin jälkeen mallista poistettiin jälleen puut ja malli vietiin fbx-formaattiin pelimoottorissa tapahtuvaa visualisointia varten.



Kuva 25. Matalan tarkkuuden teksturoitu malli ennen puiden poistoa ja pelimoottoriin vientiä.

3.3.6 Pelimoottoriin vienti ja visualisointi

Tuotettu malli tuotiin Unreal Engine 4 -pelimoottoriin, jossa mallille määriteltiin materiaalit ja kiiltävyydet. Auringonvalon ja yleisen valaistuksen simuloimiseksi näkymään rakennettiin sopiva valaistus erilaisilla valoilla. Visuaalisen ilmeen kohentamiseksi poistettujen puiden tilalle sekä muualle Dipolin ympäristöön tuotiin realistisemmän näköisiä valmiiksi luotuja puita ja maahan lisättiin aluskasvillisuutta, kuten ruohoa ja mustikanvarpuja. Lisäksi taivaalle lisättiin lentelemään muutamia valmiiksi luotuja lokkeja (kuva 26) eläväisemmän ympäristön aikaansaamiseksi. Kohteesta tehtiin tehokoneella pyörivä virtuaalitodellisuusversio, jossa käyttäjä pääsee vapaasti kulkemaan Dipolin ympäristössä käyttäen HTC Vive Pro -virtuaalitodellisuusjärjestelmää (kuvat 27 ja 28).



Kuva 26. Ympäristön elävöittämiseksi taivaalle lisätty lokki.



Kuva 27. Valmis virtuaalitodellisuuskelpoinen Unreal Engine 4 -pelimoottorissa visualisoitu Dipoli sivulta kuvattuna.



Kuva 28. Valmis virtuaalitodellisuuskelpoinen Unreal Engine 4 -pelimoottorissa visualisoitu Dipoli ylhäältä kuvattuna.

3.4 Esimerkkitapaus 2: Kansallismuseon esineet

Suomen kansallismuseo on valtakunnallinen kulttuurihistorian museo, joka toimii Suomen kulttuurihistoriallisena keskusmuseona. Museon tehtävänä on kulttuuriperinnön tutkiminen, kartuttaminen ja esittely. Suomen historian ja kulttuurihistorian kokoelmista löytyy yli puoli miljoonaa esinettä (Museovirasto, 2019). Yhteistyössä Kansallismuseon kanssa mitattiin ja mallinnettiin viisi erilaista esinettä, jotka kulkevat työstönimillä; ”huilu”, ”taulu”, ”kousa”, ”mekko” ja ”mitali”. Ohessa tarkempia tietoja esineistä:

Huilu - Klarinetti, jonka on tehnyt perimätiedon mukaan keuruulainen kansansoittaja Herman Saxberg (1830-1909).

Taulu - Sigfrid August Keinäsen teos Kehdossa vuodelta 1884.

Kousa - Ruskon kousa, ainoa Suomessa säilynyt juhlakousa vuodelta 1542.

Mekko - Rokokoopuku 1780-luvulta, ns. poloneesipuku.

Mitali - Venäläisen Pyhän Yrjön ritarikunnan Yrjönristi. Mitalissa oleva kuva on ollut Kaartin pataljoonan lipputangossa. Kaartin pataljoonalle myönnettiin Pyhän Yrjön lippu vuonna 1831.

3.4.1 Kuva-aineiston kerääminen ja käsittely

Kuva-aineistot kerättiin Nikon D810- ja Nikon D800E -järjestelmäkameroilla käyttäen linsseinä Nikkorin 14-24 millimetrin laajakulmalinssiä sekä Nikkorin 60 millimetrin makrolinssiä kuvattavasta kohteesta riippuen. Kohteista kerätyt, käytetyt ja laskentaohjelmassa orientoituneet kuvamäärät on esitetty seuraavassa taulukossa 5:

	Huilu	Kousa	Mekko	Mitali	Taulu
Kuvamäärä	814	74	87	34	235
Käytetyt kuvat	530	70	79	18	195
Orientoituneet kuvat	399	70	79	18	195

Taulukko 5. Kuvamäärät.

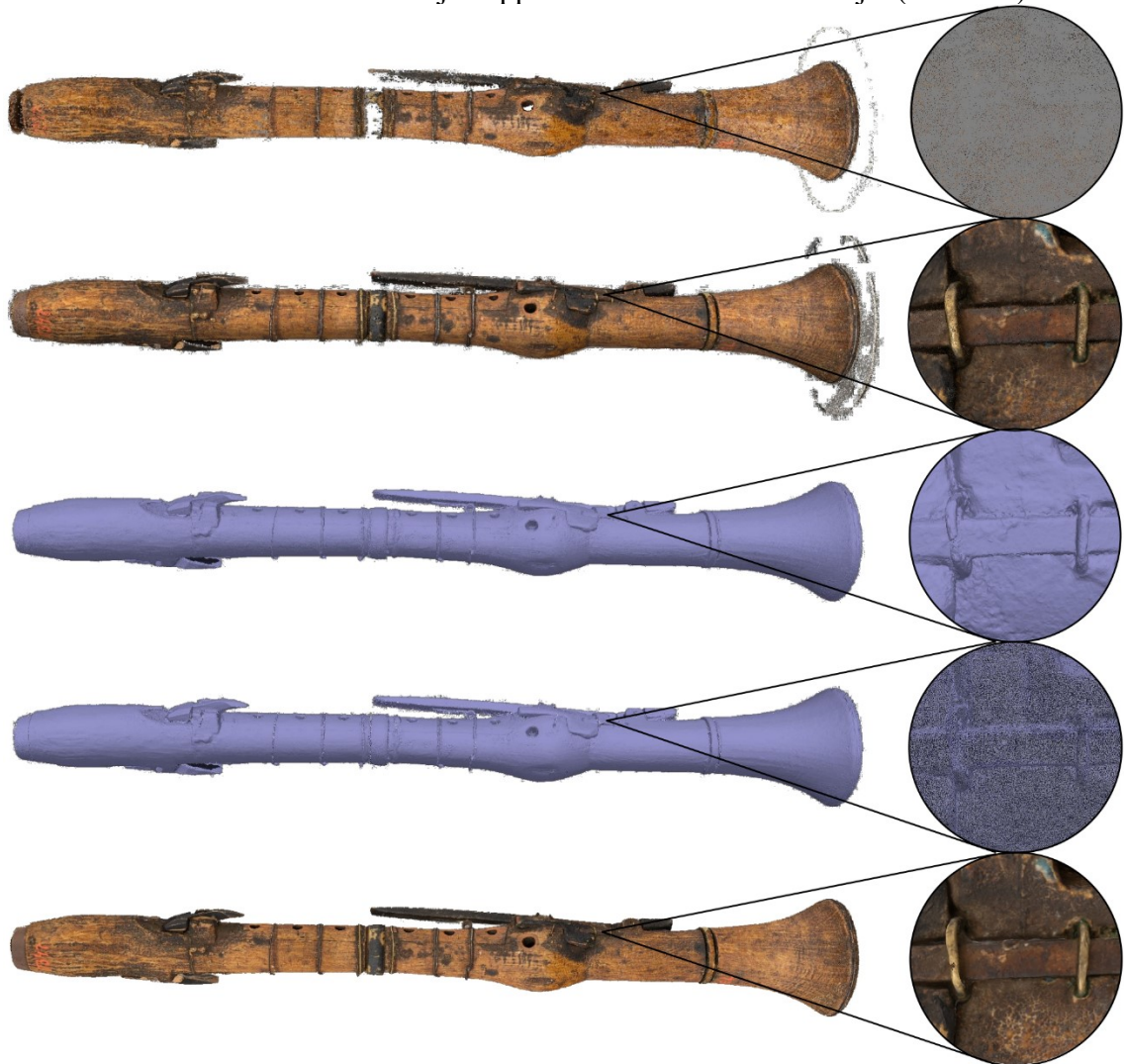
Kuvien jälkikäsittely suoritettiin Adobe Photoshop Lightroom CC -ohjelmalla. Valaistus säädettiin dynaamisesti vastaamaan toisiaan ja kuvista poistettiin terävöinti, kromaattinen aberraatio ja vinjetointi. Linssivirheitä ei korjattu sillä Agisoftin Photoscan -ohjelma korjaa ne laskennan aikana. Lopuksi kuvat muunnettiin Nikonin nef-raakakuvaformaattista jpg-formaattiin.

3.4.2 Mallin muodostaminen ja teksturointi

Esineiden mallinnus, teksturointi ja desimointi suoritettiin Agisoftin Photoscan -ohjelmalla.

3.4.2.1 Huilu

Mallin muodostus aloitettiin orientoimalla huilusta otetut kuvat käyttämällä ohjelman korkeinta tarkkuusasetusta. Tuloksena syntyi 846 653 pistettä sisältävä harva pistepilvi. Seuraavaksi harvaa pistepilveä tihennettiin laskemalla tiheä pistepilvi käyttämällä rekonstruktiossa ”Ultra High” laatuasetusta. Rekonstruktion tuloksena syntyi 285 572 478 pisteen pistepilvi. Tiheästä pistepilvestä muodostettiin teksturoitu pintamalli ohjelman meshaus- ja teksturointitoiminnoilla. Lopuksi pintamalli desimoitiin, jolloin tuloksena syntyi 5 958 550 kolmion/2 983 433 verteksin malli sekä neljä kappaletta 4k tekstuuritiedostoja. (Kuva 29)



Kuva 29. Kuvassa ylhäältä alas: Harva pistepilvi, tiheä pistepilvi, solid-malli, wireframe-malli sekä teksturoitu malli sekä tarkennukset mallin yksityiskohtaisuuden esilletuomiseksi. © Aalto-yliopisto ja Kansallismuseo.

3.4.2.2 Taulu

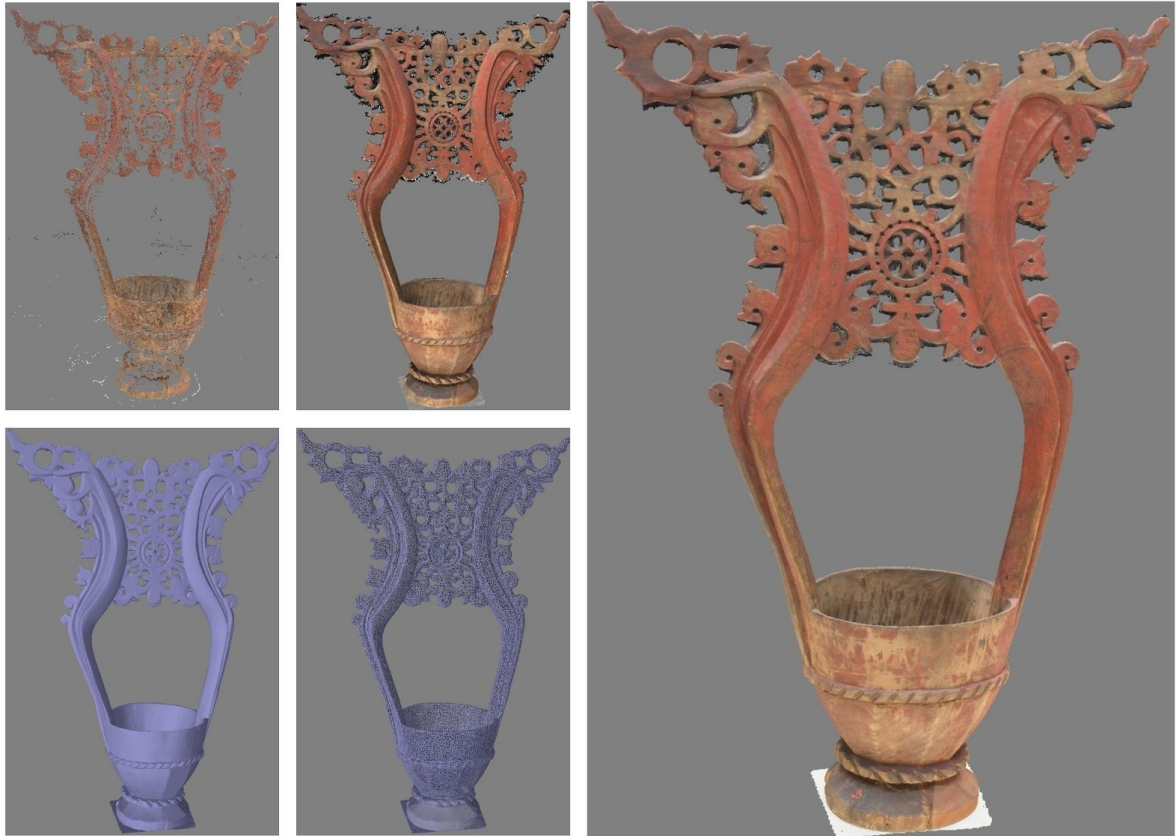
Taulun kuvat orientoitiin niin ikään käyttäen korkeinta tarkkuusasetusta. Syntynyt harva pistepilvi piti sisällään 14 648 502 pistettä. Tiheä pistepilvi laskettiin käyttäen ”Medium” laatuasetusta ja tuloksena syntyi 45 752 008 pistettä sisältävä pistepilvi. Huilun tavoin tiheästä pistepilvestä muodostettiin desimoitu teksturoitu pintamalli. Lopputuloksena syntyi 4 151 672 kolmion/2 094 797 verteksin malli sekä kahdeksan kappaletta 4k tekstuureita. (Kuva 30)



Kuva 30. Kuvassa ylhäällä vasemmalta oikealle harva pistepilvi, tiheä pistepilvi, solid-malli, wireframe-malli sekä alapuolella teksturoitu malli. Lisäksi tarkennukset mallin yksityiskohtaisuuden esilletuomiseksi. © Aalto-yliopisto ja Kansallismuseo.

3.4.2.3 Kousa

Myös kousasta otetut kuvat orientoitiin korkeinta tarkkuusasetusta käyttäen. Orientoinnin tuloksena syntyi 123 600 pistettä sisältävä harva pistepilvi. Harvasta pistepilvestä laskettiin 34 392 000 pistettä sisältävä tiheä pistepilvi rekonstruktion ”Ultra High” laatuasetusta käyttäen. Edellisten esineiden tavoin kousasta muodostettiin desimoitu ja teksturoitu pintamalli. Desimoinnissa käytettiin huomattavasti kovempia asetuksia ja lopputuloksena syntyi 99 999 kolmion/50 122 verteksin malli sekä yksi kappale 4k tekstuureita. (Kuva 31)



Kuva 31. Kuvassa harva pistepilvi (vasen yläkulma), tiheä pistepilvi (keskellä ylhäällä), solid-malli (vasen alakulma), wireframe-malli (keskellä alhaalla) sekä teksturoitu malli (oikealla). © Aalto-yliopisto ja Kansallismuseo.

3.4.2.4 Mekko

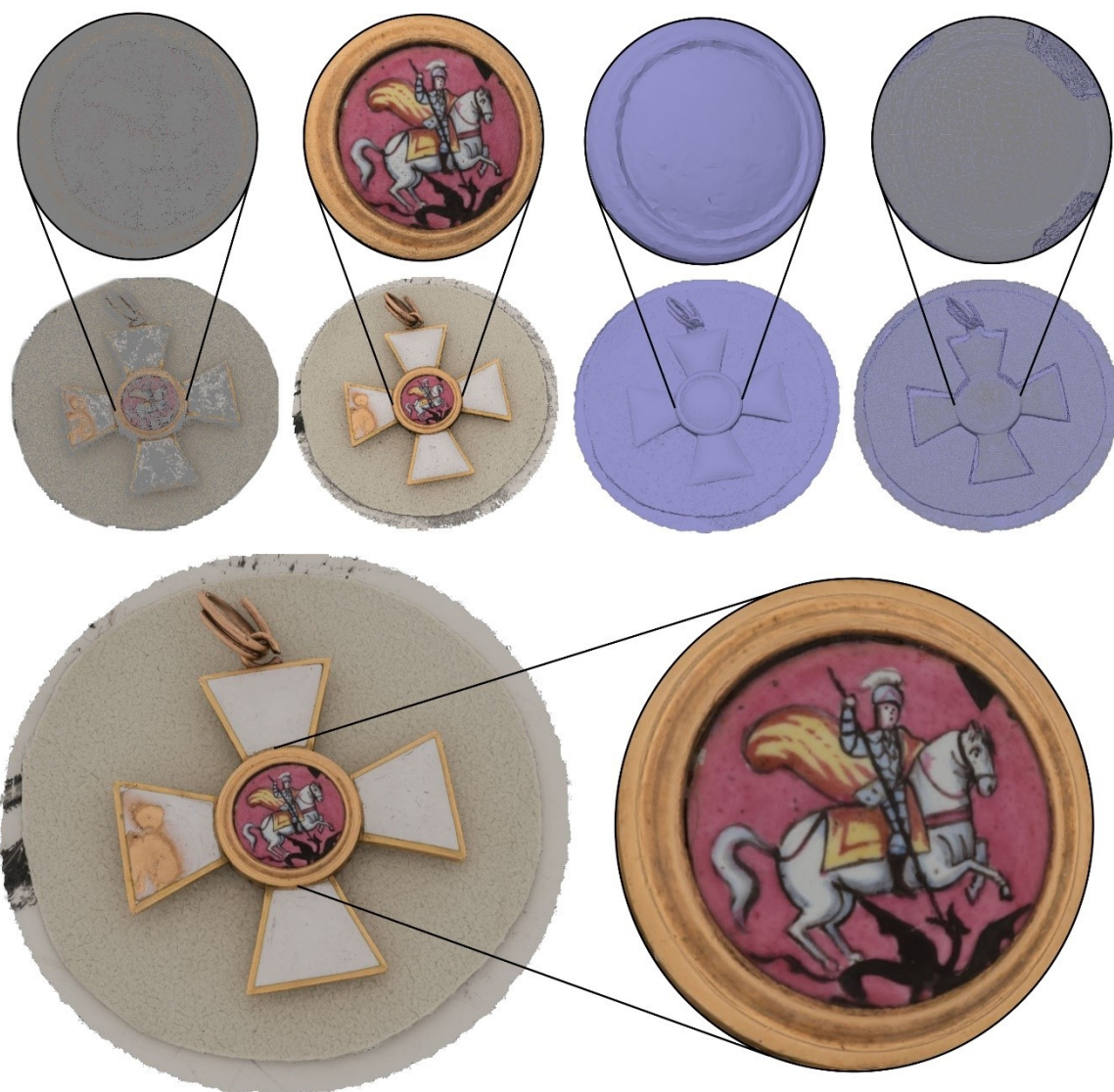
Mekon harva pistepilvi laskettiin käyttäen korkeinta tarkkuusasetusta ja tuloksena syntyi 182 501 pistettä sisältävä pistepilvi. Tiheä pistepilvi laskettiin ”Ultra High” laatuasetusta käyttäen ja syntynyt pistepilvi sisälsi 46 463 294 pistettä. Tiheästä pistepilvestä laskettiin edellisten tapaan desimoitu ja teksturoitu pintamalli. Myös mekon pintamalli desimoitiin kovemmilla asetuksilla ja lopputuloksena syntyi 100 000 kolmion/50 180 verteksin malli yhdellä 4k tekstuurilla. (Kuva 32)



Kuva 32. Kuvassa vasemmalta oikealle: harva pistepilvi, tiheä pistepilvi, solid-malli, wireframe-malli sekä teksturoitu malli. © Aalto-yliopisto ja Kansallismuseo.

3.4.2.5 Mitali

Mitalista muodostettiin harva pistepilvi korkeinta tarkkuusasetusta käyttäen. Orientoinnin seurauksena syntyi 140 463 pistettä sisältävä pistepilvi. Harvasta pistepilvestä laskettiin tiheä 19 175 866 pisteen pistepilvi ”Ultra High” laatuasetusta käyttäen. Muiden esineiden tapaan tiheästä pistepilvestä laskettiin desimoitu ja teksturoitu pintamalli. Tässäkin tapauksessa malli desimoitiin kovemmilla asetuksilla ja lopputuloksena syntyi 100 000 kolmion/52 814 verteksin malli yhdellä 4k tekstuurilla. (Kuva 33)



Kuva 33. Kuvassa ylhäällä vasemmalta oikealle harva pistepilvi, tiheä pistepilvi, solid-malli, wireframe-malli sekä alhaalla teksturoitu malli. Lisäksi tarkennukset mallin yksityiskohtaisuuden esilletuomiseksi. © Aalto-yliopisto ja Kansallismuseo.

3.4.3 Pelimoottoriin vienti ja visualisointi

Osa esineistä vietiin Unreal Engine 4 -pelimoottoriin visualisoitaviksi. Pelimoottorissa määriteltiin kohteiden valaistus ja pinnan materiaalit realistisen ilmeen aikaansaamiseksi. Pelimoottorilla tuotettiin tehokoneella pyörivä virtuaalitodellisuusversio, jossa käyttäjä pystyy vapaasti liikkumaan ja tarkastelemaan kohteita käyttäen apunaan HTC Vive Pro -virtuaalitodellisuusjärjestelmää (kuvat 34 ja 35).



*Kuva 34. Virtuaalitodellisuuskelpoisessa pelimoottoriympäristössä visualisoitu taulu.
© Aalto-yliopisto ja Kansallismuseo.*



*Kuva 35. Virtuaalitodellisuuskelpoisessa pelimoottoriympäristössä visualisoitu huilu.
© Aalto-yliopisto ja Kansallismuseo.*

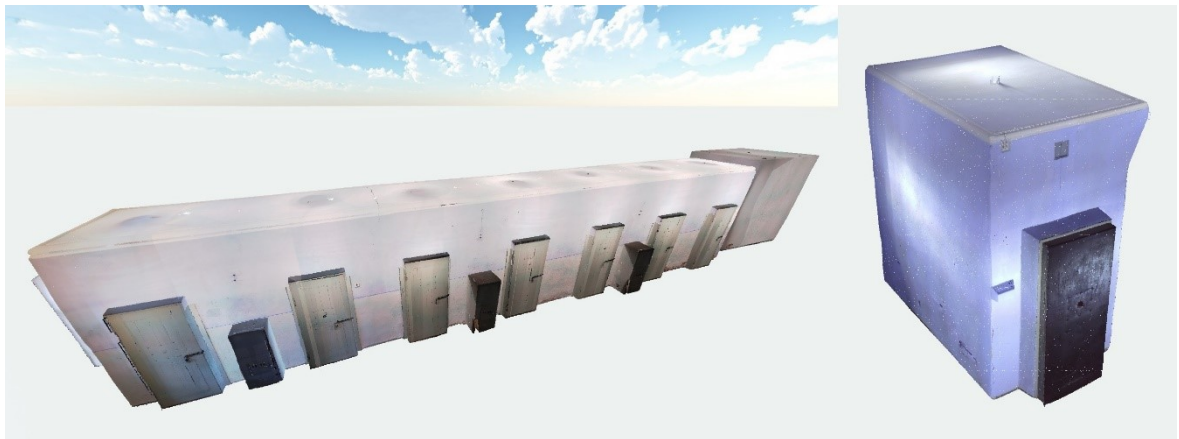
3.5 Esimerkkitapaus 3: Suomenlinnan vankityrmät

Suomenlinna on Helsingin edustalla sijaitseva merilinnoitus. Kohde liitettiin Unescon maailmanperintöluetteloon vuonna 1991. Suomenlinnassa sijaitsevat vankityrmät toimivat sisällissodan sotavankien sijoituspaikkana vuosien 1918-1919 välisenä aikana. (Suomenlinna, 2019) Itse mittauskohde koostuu käytäväalueesta sekä sen varrella olevista neljästätoista vankityrmästä. Kohteesta tehtiin kaksi erilaista mallia, toinen laser- ja kuva-aineistoon perustuen ja toinen pelkkää Matterport Pro2 3D -järjestelmää käyttämällä.

3.5.1 Laseraineiston kerääminen ja käsittely

Laseraineisto kerättiin kahta eri Faron laserkeilainta käyttäen. Vankityrmän käytävä ja puolet selleistä mitattiin Faro Focus S 350A -laserkeilaimella ja loput selleistä Faro Focus^{3D} S120 -laserkeilaimella. Laitteiden resoluutioksi valittiin lyhyehköjen mittaustäisyyksien vuoksi 12 millimetrin pistetiheys 10 metriä kohden ja pisteet mitattiin kolminkertaisella toistolla kohinan vähentämiseksi. Mittausajaksi muodostui näin ollen noin 5 minuuttia yksittäistä keilausta kohden. Vankityrmän noin 20 metriä pitkä käytävä saatiin katettua yhdeksällä mittausasemalla ja jokainen neljästätoista vankisellistä yksittäisellä mittausasemalla. Kaikki mittaukset suoritettiin vankisellien ovien ollessa kiinni, minkä vuoksi sellien yhdistäminen käytävään on mahdotonta automaattisin keinoin. Valaistusolosuhteet vaihtelivat mittausten aikana kohtalaisen paljon ajoittaisen ikkunoista tulevan auringonvalon vuoksi, tehden keilaimen väridatasta osittain hyvin epäyhtenäistä ja huonolaatuista.

Laseraineisto käsiteltiin ensimmäisen esimerkkitapauksen tavoin Faro Scene -ohjelmalla. Käytävästä kerätylle aineistolle suoritettiin prosessointi ja rekisteröinti, jotka toimivat tässä tapauksessa täysin automaattisesti. Yksittäisistä vankiselleistä oli vain yksittäinen keilaus selliä kohden, joten aineistolle suoritettiin vain prosessointi. Kaikki aineistot siivottiin väärin ja epäolennaisten pisteiden, kuten ikkunasta tulleiden heijastusten ja keilaimelle ominaisen reuna-alueiden kohinan osalta (kuva 36). Käsitellyt pistepilvet vietiin ptx-formaattiin yksittäisinä keilauksina Reality Capturessa tapahtuvaa jatkolaskentaa varten.



Kuva 36. Prosessoidut, rekisteröidyt ja siivotut pistepilvet käytävästä (vasen) ja yksittäisestä sellistä (oikea).

3.5.2 Kuva-aineiston kerääminen ja käsittely

Kuva-aineisto kerättiin parin mittauspäivän aikana käyttäen Nikon D800E -järjestelmäkameraa sekä Nikkorin 14-24 millimetrin laajakulmalinssiä. Kohde oli hämäryytensä vuoksi kuvattava jalustaa ja pitkiä valotusaikoja käyttäen (jopa 10 sekuntia). Kohteesta kerätyt kuvamäärät olivat seuraavan taulukon 6 mukaiset:

Kuvamääriä	Selli 1	Selli 2	Selli 3	Selli 4	Selli 5	Selli 6	Selli 7	Selli 8
	87	86	61	86	112	100	88	113
	Selli 9	Selli 10	Selli 11	Selli 12	Selli 13	Selli 14	Käytävä	Yhteensä
	108	110	96	95	111	98	804	2155

Taulukko 6. Kuvamäärät

Kuvien jälkikäsittely suoritettiin Adobe Photoshop Lightroom CC -ohjelmalla. Kuvien valaistus pyrittiin säätämään yhdenmukaiseksi, joskin kohteen epätasainen ja vaihteleva valaistus tuotti ongelmia. Käytävän osalta kuvien valaistusta korjattiin gradienttien avulla, sillä käytävän ikkunallinen pääty oli erittäin kirkas ja vastaavasti ikkunaton pääty erittäin pimeä. Lopuksi kuvat muunnettiin jpg-formaattiin laskentaa varten.

3.5.3 Matterport Pro2 3D -aineiston kerääminen ja käsittely

Matterportilla mitattiin sekä käytävä että vankityrmät samaan mittausprojektiin yhtenäisen mallin muodostamiseksi. Tämän vuoksi vankityrmien ovet olivat kolmea vankityrmää lukuun ottamatta auki mittauksen ajan. Hankaluuksia tuotti jälleen epätasainen valaistus, jolloin mittausasemien paikat oli valittava niin, ettei laitteen oma varjo näy mittadatassa. Kaiken kaikkiaan mittausasemia tuli 88 kappaletta, joista 51 otettiin käytävän alueelta ja loput 37 jakautuivat sellien kesken. Mittauksen lopuksi aineistoon merkittiin ikkunoiden sijainnit jälkikäsittelyä varten. Kerätty aineisto ladattiin Matterportin omaan pilvipohjaiseen laskentapalveluun lopullisen mallin muodostamista varten.

3.5.4 Laser- ja kuvadatan yhdistäminen

Laser- ja kuvapohjainen aineisto yhdistettiin Reality Capturella tehtävän aineistojen orientoinnin yhteydessä. Orientointi tehtiin käytävän sekä yksittäisten sellien osalta erikseen. Käytävän aineistosta yhdistyi yhdeksi komponentiksi 797/852 kuvaa. Jokaisen sellin osalta aineistot yhdistyivät sen sijaan täydellisesti yhdeksi komponentiksi.

3.5.5 Mallien muodostaminen ja teksturointi

Reality Capturella laskettiin yhdistetyistä laser- ja kuva-aineistoista mesh -mallit. Yksittäisten sellien mesh -malleista tuli kooltaan keskimäärin 50-80 miljoonan verteksin suuruisia ja käytävän mesh- mallista noin 300 miljoonan verteksin suuruinen. Yksittäisten vankisellien mesh- mallit desimoitiin ohjelmiston omalla desimointityökalulla noin kolmeen miljoonaan kolmioon (noin 1,5 miljoonaa verteksiä) ja käytävän malli noin kahdeksaan miljoonaan kolmioon (noin 4 miljoonaa verteksiä). Reality Capturella laskettiin myös desimoiduille malleille tekstuurit. Tekstuuriin resoluutiona käytettiin 4096 x 4096 pikseliä, jonka myötä tekstuurikarttoja yksittäisille vankiselleille muodostui 5 kappaletta ja käytävälle 25 kappaletta. Desimoidut ja teksturoidut mallit vietiin fbx-formaattiin 3DsMaxissa tapahtuvaa päällemlinnusta varten.

Matterport -järjestelmällä mitatusta datasta tuotettiin malli järjestelmän omalla automaattisella pilvipohjaisella laskentapalvelulla, josta valmiin mallin pystyi lataamaan seuraavana päivänä. Valmis malli (kuva 37) oli kooltaan 194 925 verteksin kokoinen ja sisälsi 43 kappaletta 2k tekstuureja. Lisäksi mallista oli saatavilla 9 774 789 pisteen kokoinen väritetty pistepilvi.



Kuva 37. Valmis Matterport-malli ylhäältä kuvattuna.

3.5.6 Päällemallinnusprosessi

Laser- ja kuvapohjaisen mallin päällemallinnus suoritettiin Autodeskin 3DsMax -ohjelmaa käyttäen. Päällemallinnus toteutettiin tuotettuja mesh-malleja (kuva 38 vas.) mukaillen tavallisia polygonimallinnusmenetelmiä ja retopolointityökaluja käyttäen. Jokainen selli mallinnettiin erikseen ja käytävän mallinnus toteutettiin osissa, leikkaamalla käytävä tasaisin välein neljään osakokonaisuuteen. Sellien ja käytävän mesh-malleja hyödyntäen mallinnettiin myös sellihin ja käytävään johtavat ovet. Lopputuloksena syntyi kevennetty matalan tarkkuuden malli (kuva 38 oik.) Lopulliset vaihekohtaiset kokonaisverteksimäärät on esitetty taulukossa 7.



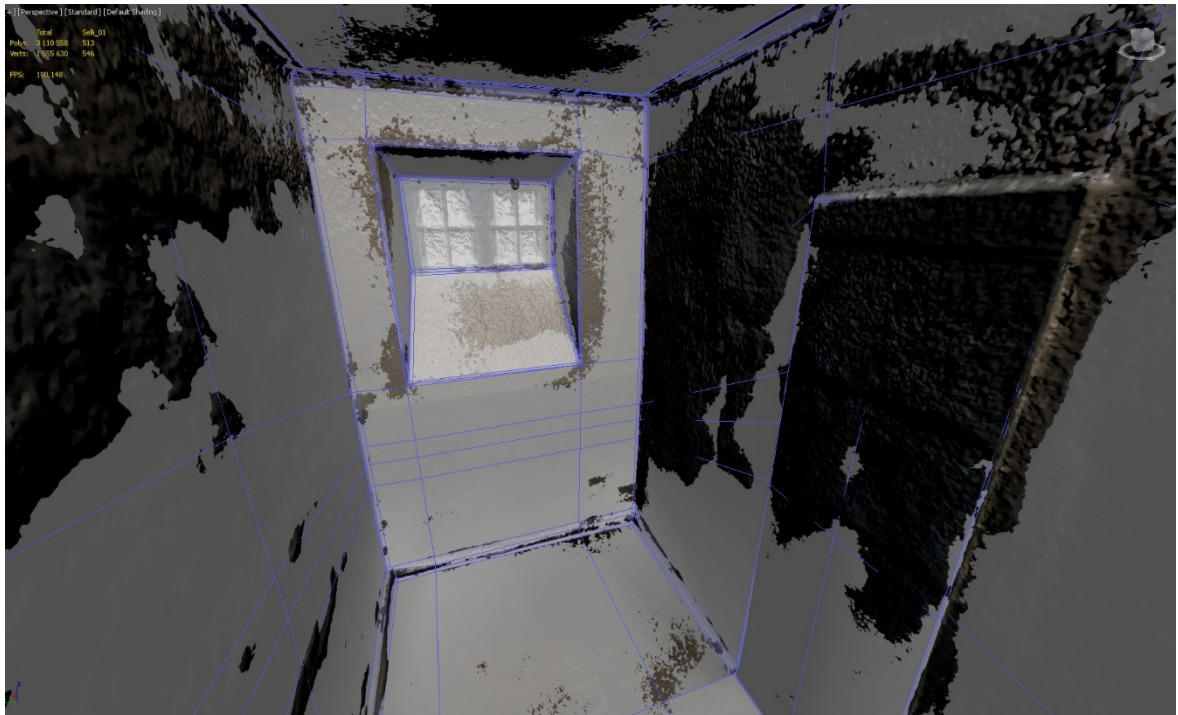
Kuva 38. 3DsMaxilla renderöidyt kuvat alkuperäisestä korkean tarkkuuden (vas.) ja päällemallinnetusta matalan tarkkuuden (oik.) mallista.

Huomionarvoista on, että Unreal Engine 4 -pelimoottoriin tuodessa mallin verteksimäärät kasvavat, sillä ne lasketaan eri tavalla mallinnusohjelmaan verrattuna. Esimerkiksi kuution jokainen kulma on mallinnusohjelmassa vain yksittäinen verteksi mutta pelimoottorissa jokaista kulmaa kohden on kolme verteksiä. Verteksillä voi olla pinnan normaali vain yhteen suuntaan, jonka vuoksi jokainen kuution sivuista vaatii oman verteksin pinnan normaalin määrittelemiseksi, tuottaen kolme verteksiä kuution kulmaa kohden.

	Kokonaisverteksimäärät (sellit+käytävä)
Alkuperäinen malli, RC	1 159 212 905
Desimoitu malli, RC	24 991 186
3DsMax	14 840
UE4	21 416

Taulukko 7. Kokonaisverteksimäärät

Tuotettujen mallien teksturoimiseksi päällemallinnetut mallit ”unwrapattiin” manuaalisesti pyrkien välttämään saumakohtia. Tämän jälkeen alkuperäisten mallien tekstuurit ”beikatitiin” luotujen UV-karttojen avulla päällemallinnettuihin malleihin (kuva 39). Ovien osalta tekstuurit otettiin sekä käytävän, että vankilasellien tekstuureista.



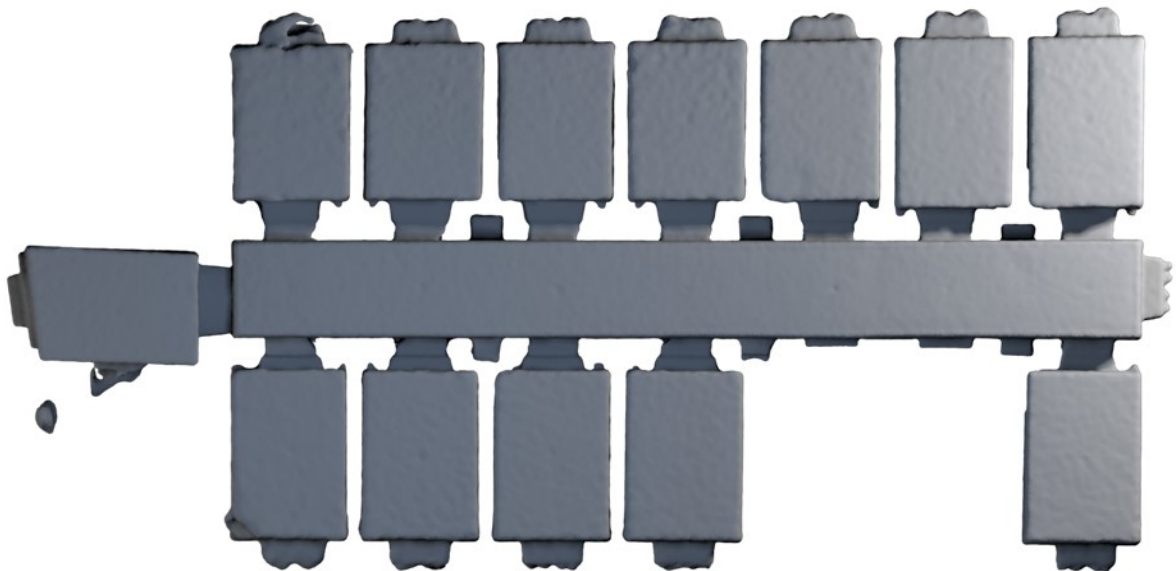
Kuva 39. Tekstuurien ”beikkaus”.

Lopullisille tekstuurikartoille tehtiin vielä pieniä korjauksia Adobe Photoshop -kuvankäsittelyohjelmalla. Tekstuurimäärät sellien, käytävän ja ovien osalta on esitetty taulukossa 8.

	Tekstuurien resoluutio	Tekstuurikarttojen määrä	Alkuperäisten tekstuurikarttojen määrä (RC)
Sellit	4096 x 4096 px	1 kpl/selli	5 kpl/selli
Käytävä	4096 x 4096 px	4 kpl	25 kpl
Ovet	2048 x 2048 px	1 kpl/ovi	-

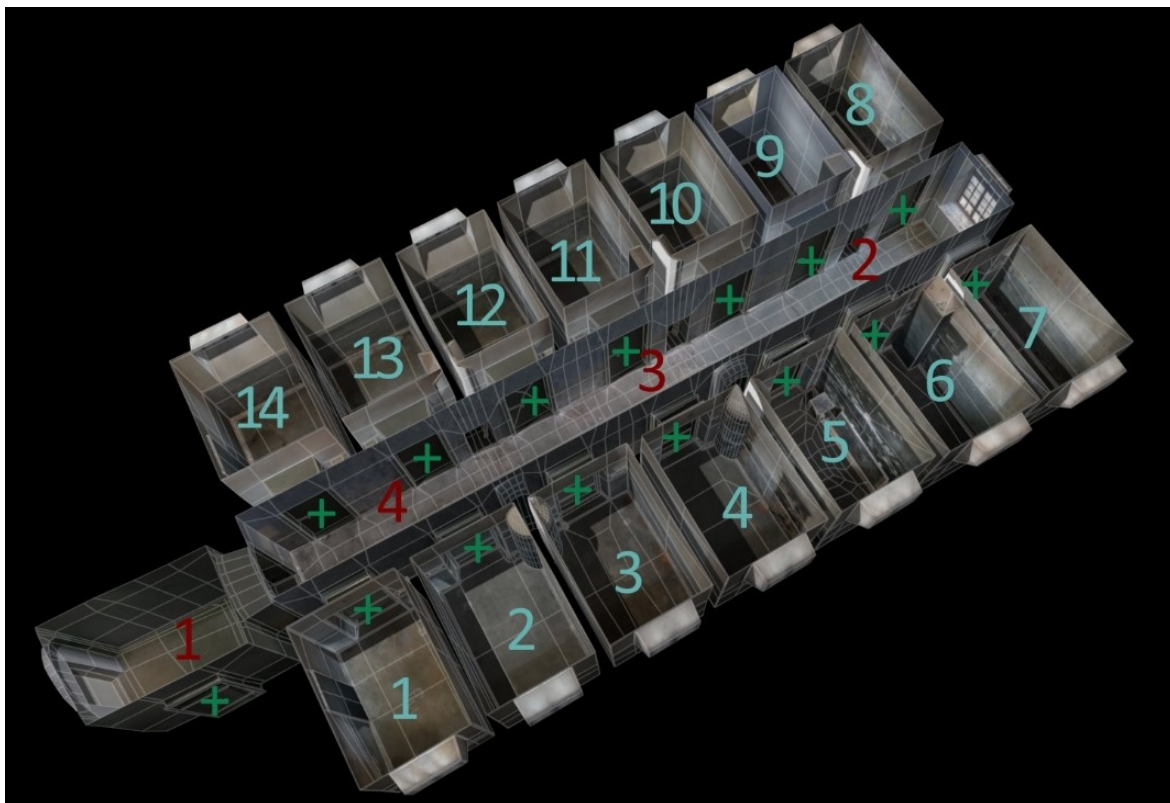
Taulukko 8. Tekstuurikarttojen määrät

Sellit laserkeilattiin ja kuvattiin ovet kiinni, joten niitä ei voinut suoraan yhdistää toisiinsa. Tämän vuoksi sellien ja käytävän yhteensovittamisen apuna käytettiin Zeb Revo RT -käsi-keilaimella hankittua karkeaa referenssipistepilveä (kuva 40), joka mitattiin ovien ollessa auki. Pistepilven avulla sellit sovitettiin suunnilleen oikeisiin paikkoihin käytävään nähden. Malli vietiin tämän jälkeen fbx-formaattiin pelimoottorissa tapahtuvaa visualisointia varten.



Kuva 40. Zeb Revo RT -käsi-keilaimella tuotettu karkea referenssimalli sellien ja käytävän yhdistämistä varten.

Päällemallinnus oli paljon aikaa vaativa työvaihe, jossa yksittäisen vankisellin mallintamiseen kului keskimäärin yksi päivä, käytävän mallintamiseen noin 4 päivää ja vankisellien ovien mallintamiseen 7 päivää. Näin ollen kaikkien mallin osien (kuva 41) päällemallinnukseen meni yhteensä noin 25 päivää.



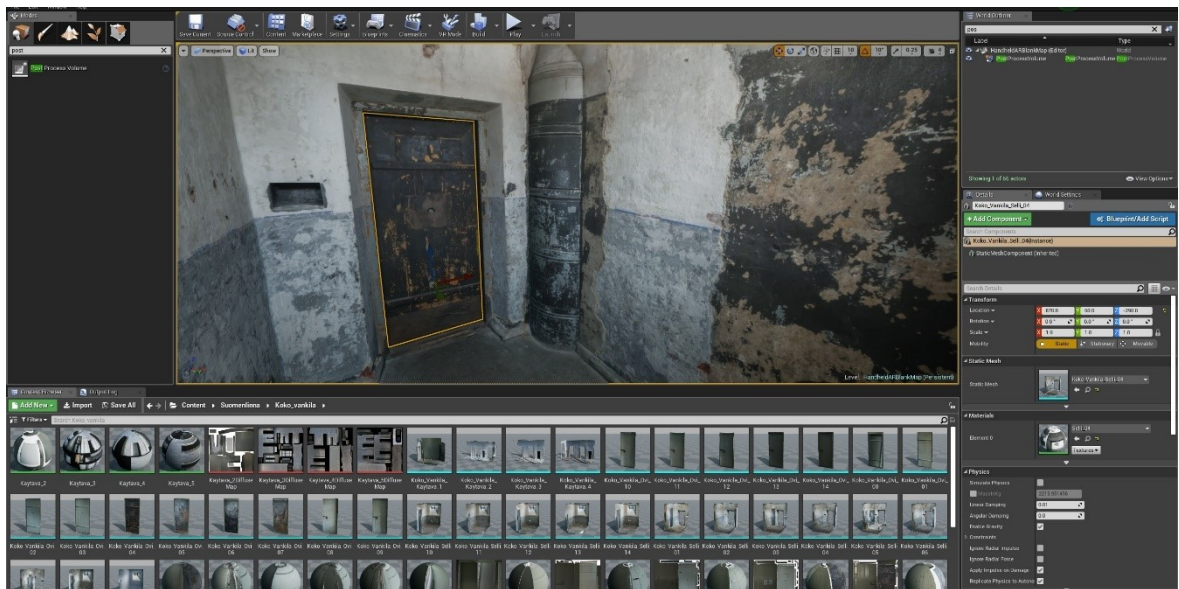
Kuva 41. Mallin eri osat eroteltuna, vaaleansinisellä numeroinnilla kaikki kohteen sellit, punaisella numeroinnilla käytävän eri osat. Lisäksi plusmerkein on merkitty kaikki ovet.

3.5.7 Matterport-aineiston käsittely

Matterport-aineistoa ei juurikaan käsitelty sen soveltuvan kokonsa vuoksi. Tekstuurikarttoja muokattiin Adobe Photoshopilla manuaalisesti ongelmakohtien korjaamiseksi ja epätoivottujen kohtien poistamiseksi.

3.5.8 Hybridimallin pelimoottoriin vienti ja visualisointi

Valmis teksturoitu malli vietiin Unreal Engine 4 -pelimoottoriin (kuva 42), jossa pääasiallisesti määriteltiin vain materiaalit, kiillot ja rakenneltiin kohteen valaistus vastaamaan kuka-kuinkin mittaushetkellä vallinnutta valaistusta (kuvat 43 ja 44). Lopputuloksena syntyi toteutus, jossa käyttäjä voi liikkua vapaasti mallinnetussa tilassa HTC Vive Pro -virtuaalito-dellisuusjärjestelmää hyödyntäen.



Kuva 42. Näkymä Unreal Engine 4 -pelimoottoriin tuoduista mallin osista ja tekstuureista.



Kuva 43. Näkymä valmiin pelimoottorissa visualisoidun Suomenlinnan vankityrmän käytävästä.



Kuva 44. Näkymä valmiin pelimootorissa visualisoidun Suomenlinnan vankityrmän sellistä.

3.5.9 Matterport-mallin pelimoottoriin vienti ja visualisointi

Matterportilla tuotettu malli vietiin Unity 5 -pelimoottoriin lopullista visualisointia varten. Visualisointi koostui lähinnä kohteen valaistuksen rakentelusta. Lopputuloksena syntyi toteutus, jossa käyttäjä pystyy vapaasti liikkumaan kohteen tiloissa (kuvat 45 ja 46).



Kuva 45. Kuva Suomenlinnan vankityrmistä tuotetusta pelimootoritoteutuksesta.



Kuva 46. Kuva Suomenlinnan vankityrmistä tuotetusta pelimoottoritoteutuksesta.

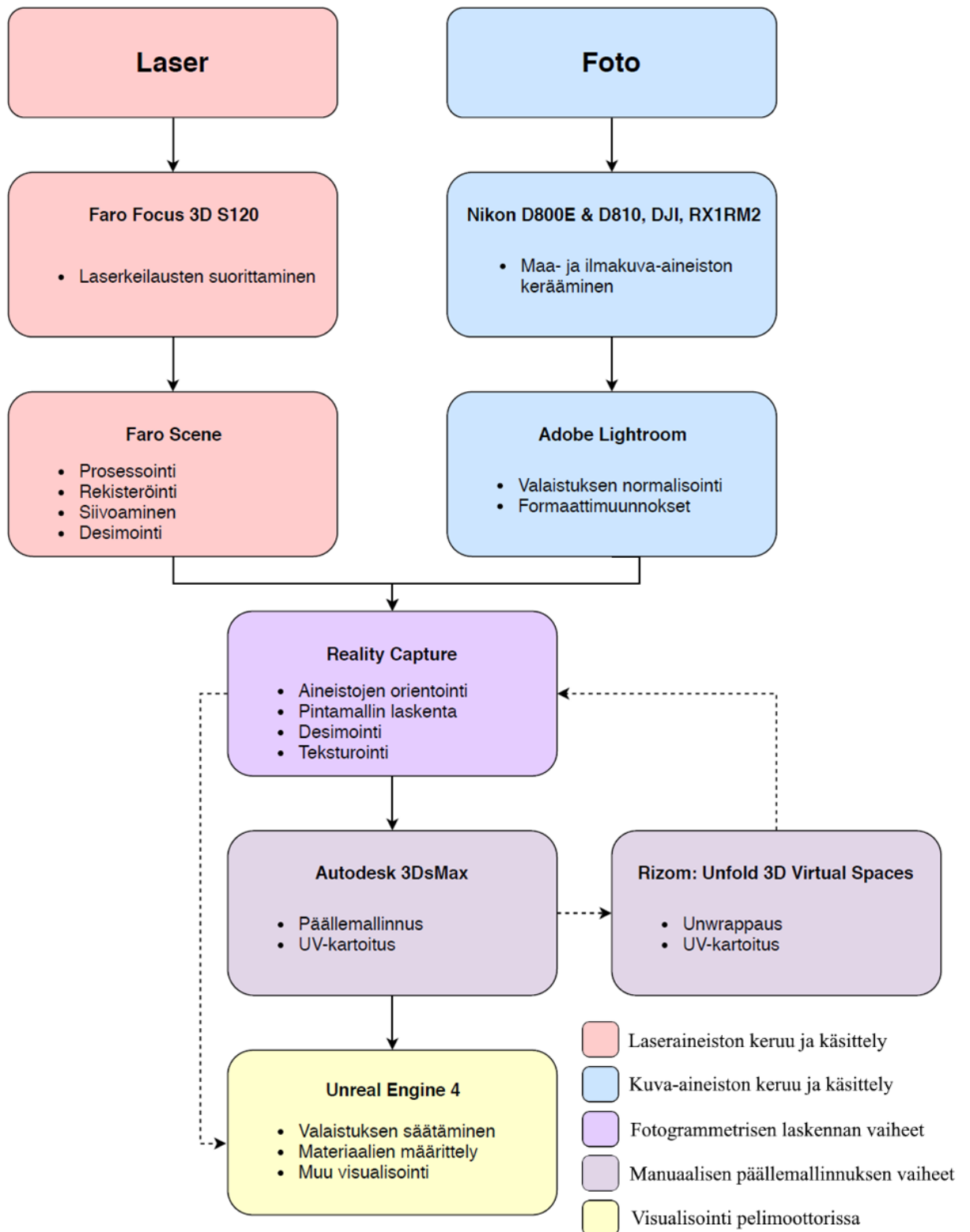
4 Tulokset

Esimerkkitapausten pohjalta on saatu johdettua seuraavanlaiset prosessit pelimoottorikel-poisten mallien aikaansaamiseksi.

4.1 *Dipoli*

Kaaviossa on kuvattu Dipolin mittaamisessa ja mallintamisessa käytetyt työvaiheet pääpiir-teittäin. Prosessi alkaa laser- ja kuva-aineiston keräämisellä, jonka jälkeen kyseiset aineistot käsitellään asianmukaisilla sovelluksilla laskentaa varten. Käsitellyt aineistot siirretään fo-togrammetriseen laskentaohjelmaan ja niistä lasketaan korkean resoluutioon teksturoitu pin-tamalli. Pintamallista lasketaan myös desimoitu versio, jota käytetään 3D-mallinnusohjel-massa manuaalisen päällemallinnuksen apuna kevyen ja geometrisesti tarkan 3D-mallin muodostamisessa. Valmiille mallille tuotetaan UV-kartat siihen soveltuvalla ohjelmalla, jonka jälkeen malli tuodaan takaisin fotogrammetriseen laskentaohjelmaan korkearesoluuti-aisen mallin tekstuurien uudelleenprojisointia varten. Lopulta teksturoitu malli viedään pe-limoottoriin visualisoitavaksi.

Kuvassa 47 laserkeilausaineiston keruu ja käsittely on merkitty punaisella ja kuvapohjaisen aineiston keruu ja käsittely sinisellä. Fotogrammetrisessä laskentaohjelmassa tehtävät vai-heet ovat merkitty puolestaan lilalla, päällemallinnuksen ja UV-kartoituksen vaiheet har-maalla sekä pelimoottorissa tapahtuva visualisointi keltaisella.

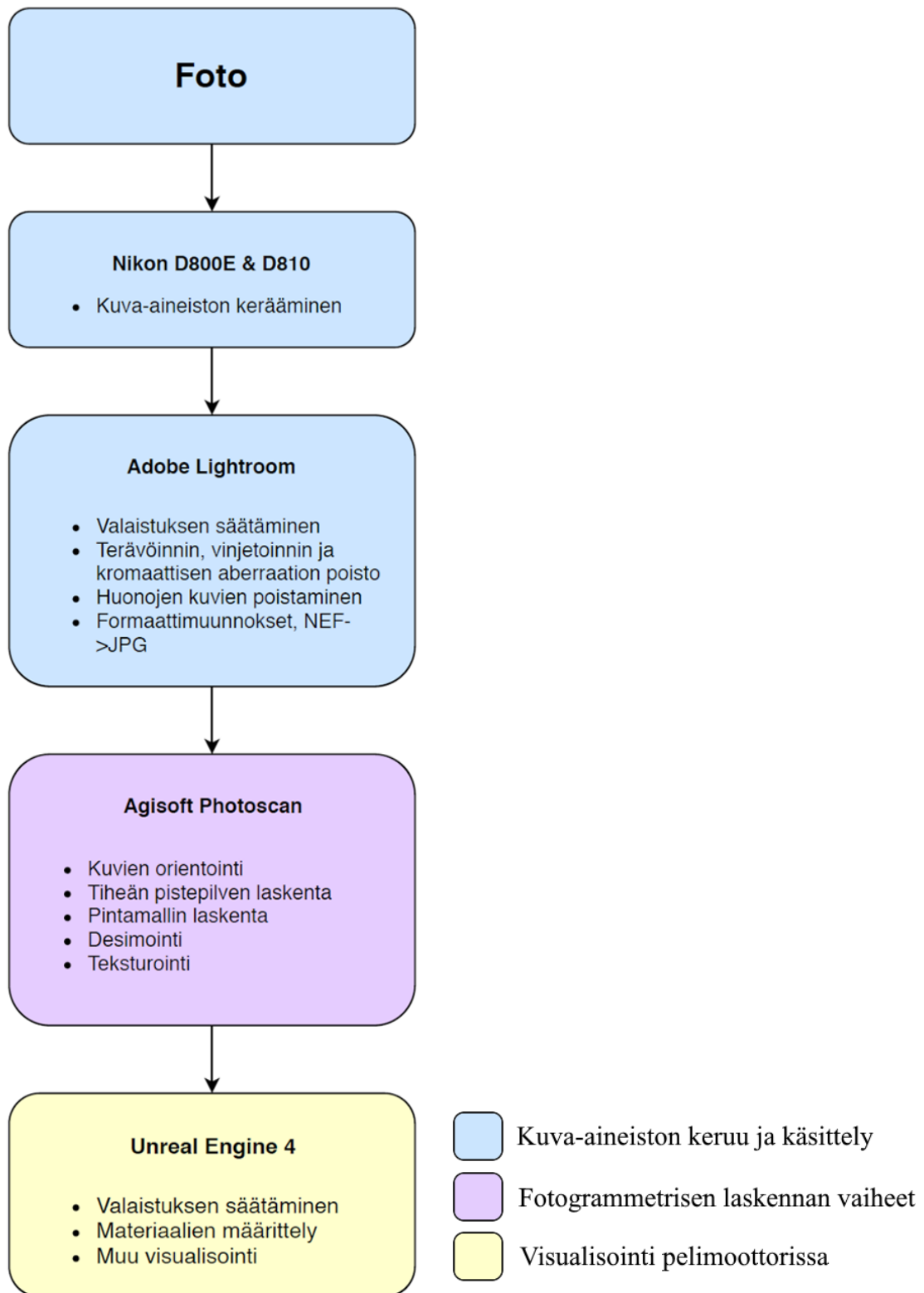


Kuva 47. Dipolin hybridimittaus- ja -mallinnusprosessi.

4.2 Kansallismuseon esineet

Kaaviossa on kuvattu Kansallismuseon esineiden mittaus- ja mallinnusprosessissa käytetyt työvaiheet. Prosessi on melko suoraviivainen ja se alkaa kuva-aineiston keräämisellä, jonka jälkeen kerätty aineisto käsitellään fotogrammetrista laskentaa varten sopivaksi. Varsinainen fotogrammetrinen laskenta sekä pintamallien desimointi ja teksturointi suoritetaan fotogrammetrisella ohjelmalla. Tämän jälkeen tuotetut mallit viedään suoraan pelimoottoriin visualisoitaviksi.

Kuvassa 48 kuva-aineiston keruu ja käsittely on merkitty sinisellä, fotogrammetrisella laskentaohjelmalla tehtävät toimenpiteet lilalla ja pelimoottorilla tapahtuva visualisointi keltaisella värillä.



Kuva 48. Kansallismuseon esineiden kuvapohjainen mittaus- ja mallinnusprosessi.

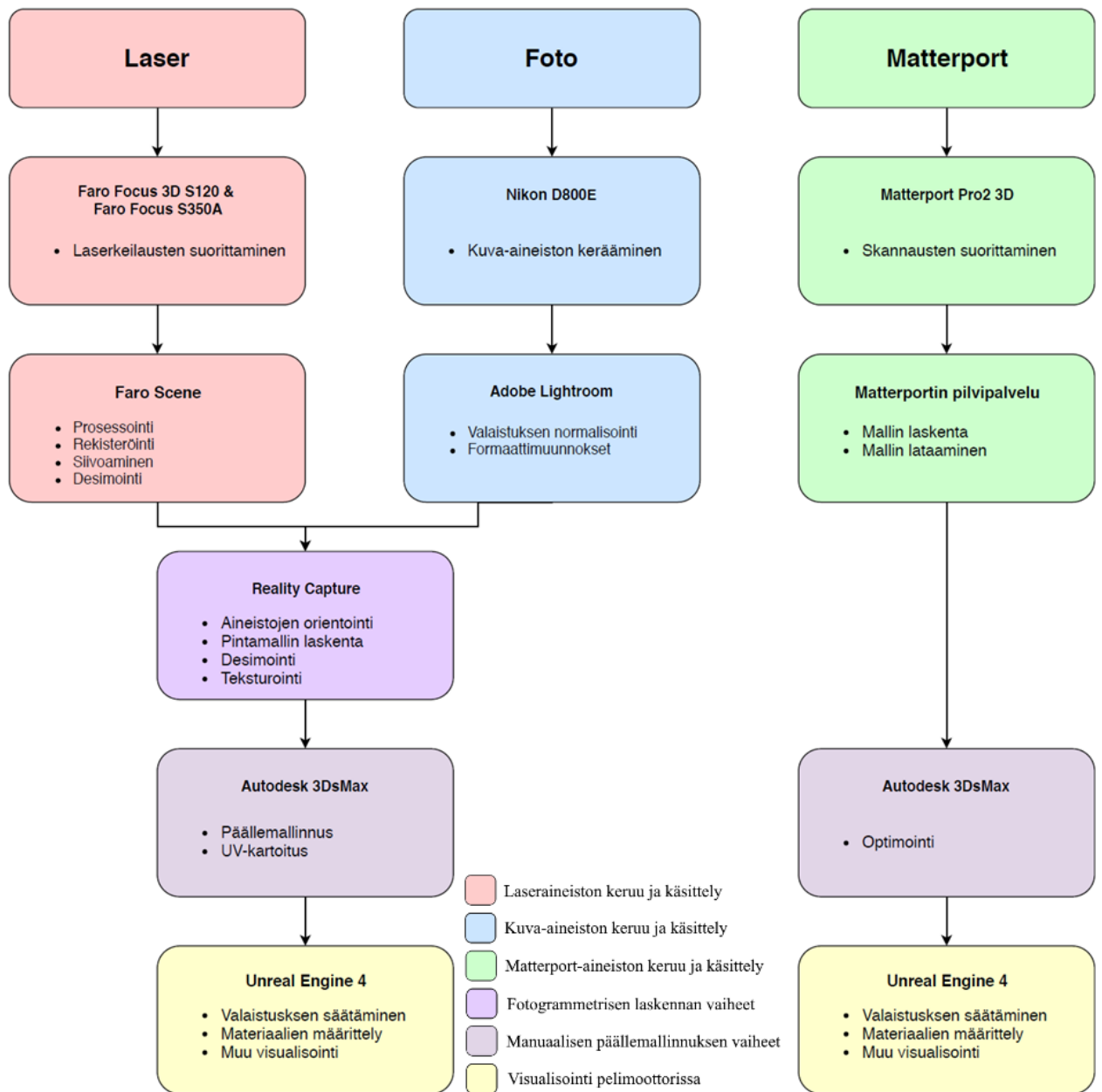
4.3 Suomenlinnan vankityrmät

Kaaviossa on kuvattu Suomenlinnan vankityrmien mittaus- ja mallinnusprosessissa käytetyt työvaiheet. Kaavio pitää sisällään sekä kuva- ja laserpohjaisen mallinnusmenetelmän että Matterport-syvyyskamerapohjaisen mallinnusmenetelmän.

Laser- ja kuvapohjainen prosessi alkaa aineiston keruulla, jonka jälkeen kerätty aineisto käsitellään soveltuvilla ohjelmilla laskentaa varten sopivaksi. Tämän jälkeen fotogrammetrisella ohjelmalla suoritetaan aineistojen yhdistäminen sekä pintamallin laskenta ja teksturointi. Teksturoitua pintamallia käytetään 3D-mallinnusohjelmassa manuaalisen päällemallinnuksen apuna kevyen ja geometrisesti tarkan 3D-mallin ja UV-karttojen muodostamisessa. Valmis malli viedään lopuksi pelimoottoriin visualisointia varten.

Matterport-syvyyskamerapohjainen prosessi alkaa niin ikään aineiston keruulla. Tämän jälkeen kerätty aineisto ladataan Matterportin pilvipohjaiseen laskentapalveluun mallin muodostamista varten. Laskentapalvelun muodostamalle mallille on mahdollista tehdä joitain muokkauksia ennen sen viemistä pelimoottoriin visualisointia varten.

Kuvassa 49 laseraineiston keruu ja käsittely on merkitty punaisella, kuva-aineiston keruu ja käsittely sinisellä ja Matterport-aineiston keruu ja käsittely vihreällä. Fotogrammetrisella laskentaohjelmalla tehtävät vaiheet on merkitty lilalla, 3D-mallinnusohjelmalla tehtävään päällemallinnukseen liittyvät vaiheet harmaalla ja pelimoottorissa tehtävä visualisointi keltaisella.



Kuva 49. Suomenlinnan vankityrmien hybridi- ja Matterport -mittaus- ja -mallinnusprosessit.

5 Vertailua

5.1 Havainnot esimerkkitapauksista

5.1.1 Dipoli

Dipolin mittaamiseksi ja mallintamiseksi ei alun perin ollut minkäänlaista suunnitelmaa, jonka vuoksi dataa on kerätty hyvin epäoptimaalisesti ja hajanaisesti. Mittadataa kerättiin usealla eri mittalaitteella useina eri päivinä noin vuoden mittaisen ajanjakson aikana. Valaistusominaisuudet sekä kasvillisuustilanne vaihtelivat tämän takia eri mittalaitteiden välillä huomattavan paljon ja vaikeuttivat erityisesti kuvapohjaisen datan yhtenäistämistä ja yhdistämistä. Runsas alueella liikkuva ihmismäärä häiritsi myös mittauksia ja sai aikaan väritysvirheitä laseraineistossa.

Mittauksen ja mallinnuksen onnistumista on mahdollista parantaa suunnittelemalla mittaukset paremmin. Esimerkiksi aineistojen välisiltä valaistuseroilta ja sen tuomilta ongelmilta välttytään suorittamalla koko aineistonkeruu lyhyemmän ajanjakson sisällä otollisempien valaistusolosuhteiden vallitessa. Samalla ehkäistään aineistojen välisten geometrinen muutosten, kuten kasvillistilanteen, aiheuttamia ongelmia, joista on haittaa aineistojen orientoinnissa ja yhdistämisessä.

Dipolin katosta kahdella eri dronella kerätty materiaali osoittautui vaikeaksi yhdistää maasta kuvattuun aineistoon. Tämä johtui osittain mittausten ajallisista eroista mutta todennäköisesti myös kuvanlaadullisista seikoista. Maa- ja ilmakuva-aineistojen yhdistämisen helpottamiseksi tulisi käyttää maahan asetettavia tähyksiä sekä ottaa nadiiri- ja viistokuvat koko kohteen alueelta vain yhdellä suuren resoluution omaavalla kuvausdronella. Suurempi resoluutio vähentää myös kuvien määrää, jolloin Reality Capturen kuvaraja ei tule niin helposti täyteen.

Hybridimenetelmä vaikuttaa soveltuvan varsinkin tämän kaltaisiin isoihin ja monimutkaisiin kohteisiin hyvin, sillä tarvittava geometria saadaan laserkeilaamalla kohtuullisen luotettavasti ja kuva-aineisto tarjoaa huomattavasti paremmat tekstuurit laseraineistoon verrattuna.

5.1.2 Kansallismuseon esineet

Kansallismuseon esineet kuvattiin noudattaen fotogrammetrisen mittauksen periaatteita studiomaaisessa ympäristössä, jonka vuoksi mallien muodostaminen onnistui ilman ongelmia ja tuloksena syntyneet mallit olivat hyvälaatuisia. Malleille ei myöskään tarvinnut tehdä manuaalista päällemallinnusta, vaan mallit desimoitiin jo laskentavaiheessa sopivan kokoisiksi. Näistä syistä johtuen prosessi oli huomattavan nopea esimerkiksi Suomenlinnan vankityrmien mallinnukseen verrattuna. Huomioitavaa on kuitenkin kohteena olevien esineiden soveltuminen erittäin hyvin tämän kaltaiseen mallinnukseen. Suurille ja monimutkaisille kohteille olisi todennäköisesti suoritettava lisäksi päällemallinnus, joka kasvattaisi tuotantoaikojä merkittävästi.

5.1.3 Suomenlinnan vankityrmit

Suomenlinnan vankityrmien valaistus tuotti hieman hankaluuksia, sillä käytävän ainoa valonlähde oli kattolamppujen lisäksi käytävän toisessa päässä oleva ikkuna. Kattolamput pidettiin kuitenkin pois päältä kuvauksen ajan luonnollisemman valaistuksen ja kovien varjojen välttämiseksi. Ikkunasta tullut valo ei kuitenkaan riittänyt valaisemaan koko käytävää

tasaisesti, jonka takia käytävän toinen pääty jäi hyvin hämäräksi. Kuvien valaistuksen yhtenäistäminen oli näin ollen melko haastavaa ja kuvia jouduttiin korjaamaan muun muassa gradienttien avulla. Samoja valaistusongelmia oli myös laserkeilainten keräämässä kuva-datassa, jossa ikkunan puoli oli palanut puhki ja pimeämpi puoli ei näkynyt juuri lainkaan. Lisäksi ikkunasta tuleva valon määrä vaihteli jonkin verran pilvien peittäessä auringon, mikä hankaloitti tasalaatuisen valaistuksen aikaansaamista.

Matterport mittauksissa oli erityisesti huomioitava valaistus ja lamppujen sijainnit suhteessa laitteeseen, sillä mitatessa oli pyrittävä välttämään laitteen itsensä aiheuttamia varjoja mitausaineistoon. Tämä johti joissain tapauksissa mittausgeometrian kannalta epäoptimaaliseen mittalaitteen sijaintiin etenkin, kun laitteen mittausetäisyys on hyvin lyhyt.

Lopputuloksena syntyneet mallit vaihtelevat laadullisesti melko paljon. Matterport mallin muodostaminen on huomattavasti nopeampaa ja helpompaa kuin hybridimenetelmällä tuotettu malli, mutta sen visuaalinen ilme ja geometrinen tarkkuus on selkeästi heikompi laatuinen.

5.2 Esimerkkitapausten väliset havainnot

5.2.1 Kuvapohjainen menetelmä

Kuvapohjaista menetelmää on pidetty yhtenä halvimmista tavoista tuottaa visuaalisesti laadukkaan näköisiä 3D-malleja (Remondino, 2006). Menetelmä vaikuttaa edelleen hyvin edulliselta, etenkin kun kuvien ottaminen onnistuu nykyisin lähes millä tahansa kameralla ja soveltuvien laserkeilainten hinnat ovat ainakin toistaiseksi vielä hyvin korkeita. Erityisen hyödyllistä mallinnuksen kannalta on menetelmän tuottamat laadukkaat tekstuurit 3D-mallien lisäksi. Laadukkaita tekstuureita vaaditaan esimerkiksi juuri kulttuuriperintökohteiden täydellisessä dokumentoinnissa (Haala & Alshawabkeh, 2006). Menetelmä vaatii kuitenkin toimiakseen tietyntylaiset olosuhteet, kuten tasaisen valaistuksen, minkä vuoksi menetelmän soveltaminen tietyntylaisissa mittauskohteissa, kuten Suomenlinnan vankityrmissä, on haastavaa. Olosuhteiden lisäksi mallinnettavan kohteen on oltava tarpeeksi piirteikas, jotta automaattinen mallinnus onnistuu (Remondino, 2006). Menetelmän käyttö ei myöskään ole aivan niin käyttäjäystävällistä kuin laserkeilainten tai syvyyskameroiden, jotka ovat luonteeltaan paljon automaattisempia eivätkä vaadi käyttäjältä yhtä paljon tietotaitoa. Miinuksena on myös mallien mittakaavattomuus, josta voi olla haittaa etenkin laajennetun todellisuuden sovelluksia tuottaessa.

5.2.2 Hybridimenetelmä

Hybridimenetelmä on todettu parhaaksi tavaksi tuottaa laadukkaita 3D-malleja, sillä se yhdistää kummankin mittausmenetelmän parhaat ominaisuudet. Laserkeilaamalla saadaan tuotettua tiheitä geometrisesti tarkkoja pistepilviä jopa pimeistä ja tekstuurittomista kohteista. Fotogrammetrian avulla puolestaan saadaan tuotettua korkean resoluution omaavia teksturoituja malleja. (Guarnieri et al., 2012; Rönnholm, 2007) Hybridimenetelmä vaikuttaa parhailta tavalta myös Dipolin sekä Suomenlinnan vankityrmien fotorealistisessa mallinnuksessa, sillä laserpistepilvet toimivat monimutkaisissa kohteissa geometrisena runkona kuva-aineistolle ja täyttivät piirteettömien ja heikosti valaistujen paikkojen aiheuttamat reiät. Oikean maailman kohteisiin sai näin myös kätevästi mittakaavan, jolloin mallit ovat todellisen kokoisia pelimoottoriin vietäessä.

Hybridimallien tuotannossa on kuitenkin omat ongelmansa, mikä pidentää tuotantoaikoja (Haala & Alshawabkeh, 2006). Erityisesti kuva- ja laseraineiston yhdistäminen on hankalaa järkevästi, kuten Dipolin kohdalla, sillä molempia aineistoja tukevia ohjelmia on hyvin vähän ja nekin ovat vasta alkutekijöissään. Laserkeilainteknologia on lisäksi melko kallista sekä laitteiden että käsittelyyn tarvittavien ohjelmistojen osalta, jonka vuoksi kynnys menetelmän käyttöön voi olla korkea.

5.2.3 Syvyyskamerapohjainen menetelmä

Tässä työssä käytetyllä Matterport Pro2 3D -syvyyskameralla tehtävä mittaus- ja mallinnus on huomattavasti nopeampaa kuin laser- ja kuvapohjaisilla menetelmillä. Esimerkiksi Suomenlinnan vankityrmien mittaus ja mallinnus kesti kokonaisuudessaan vain pari päivää. Vertailun vuoksi hybridimenetelmällä mallin tuottamiseen meni useampi viikko. Erot syntyvät suurilta osin päällemallinnusvaiheen vuoksi ja itse laskentavaihe on vain jonkin verran pidempi hybridimallin osalta. Visuaalisesti ja geometrisesti menetelmä tuottaa kuitenkin heikompaa jälkeä kuin hybridimenetelmä. Myös Pulcrano et al. (2019) ovat todenneet menetelmän nopeaksi mutta verrattain epätarkaksi verrattuna laser- ja kuvapohjaisiin menetelmiin.

5.3 Tuloksia koskevat rajoitukset

Yleisellä tasolla yksi suurimmista vaikeuksista oli löytää yhtenäistä prosessikulkua erilaisten ohjelmistojen ja laitteiden valtavasta määrästä johtuen. Jokainen ohjelmisto ja laite toimii hieman eri tavoin, jonka vuoksi yksiselitteisiä menetelmäkohtaisia prosesseja on erittäin hankalaa muodostaa. Tämä ilmeni jo kirjallisuuskatsauksen nykyaikaisia mittaus- ja mallinnusprosesseja selvittäessä, joissa menetelmät olivat kuvattu tyypillisesti vain tiettyjen ohjelmistojen ja laitteiden näkökulmasta. Tästä johtuen tämän tutkimuksen menetelmien toimivuus on testattu vain työssä esiteltyjä ohjelmia ja laitteita hyödyntäen, jonka vuoksi poikkeavilla tavoilla tuotettujen lopputulosten onnistumista ei voida taata. Prosessin eri vaiheet on kuitenkin mahdollista toteuttaa myös muilla kuin esiteltyillä ohjelmilla ja laitteilla, mutta vaihtoehtoisten ohjelmien ja laitteiden tulee soveltua ominaisuuksiltaan prosessin eri vaiheiden suorittamiseen.

Dipolin osalta huono ennakkosuunnittelu ja datan keruun epäsystemaattisuus yhdessä mitausajankohtien eriaikaisuuteen vaikuttivat merkittävästi mallinnusmenetelmän toimivuuteen. Suomenlinnan vankityrmien osalta sää aiheutti jonkinasteista vaihtelua kohteen valaistuksessa, mikä saattoi osaltaan vaikuttaa mallinnusmenetelmän toimintaan. Kohteen mittamiseen oli käytössä vain tietyt ajankohdat, jonka vuoksi mittauksia jouduttiin tekemään epäoptimaalisissa valaistusolosuhteissa.

Kohteen ominaisuuksilla, kuten pinnan kiiltävyydellä ja tekstuureilla on myös suuri merkitys eri menetelmien toiminnan kannalta. Esimerkiksi kuvapohjaisella menetelmällä on hyvin vaikeaa tuottaa fotogrammetrista mallia tekstuurittomista, kiiltävistä ja läpinäkyvistä kohteista. Tekstuurittomuus ei juuri vaikuta hybridimenetelmän ja syvyyskamerapohjaisen mittauksen toimintaan, mutta ongelmia aiheuttavat sen sijaan kiiltävät, läpinäkyvät ja heijastavat pinnat. Tämän vuoksi joitain kohteita voi olla vaikeaa mitata ja mallintaa esiteltyjen menetelmien avulla. Tämä ei välttämättä ilmene työn tuloksista, sillä tutkimuksen esimerkkitaustan kohteet olivat ominaisuuksiltaan sopivat suurimmilta osin.

Mallien käyttötarkoitus toimii määrittävänä tekijänä mallien optimoinnin suhteen, jonka vuoksi yksiselitteistä optimointikuvausta on vaikea antaa. Tämän työn osalta muodostettiin

vain tietokoneelle tarkoitettuja VR malleja, mutta esimerkiksi mobiililaitteille sopivan mallin tuottaminen voi vaatia lisäoptimointia. Optimointimenetelmät pysyvät kuitenkin samoina käyttötarkoituksesta riippumatta.

5.4 Tulevaisuuden näkymät

Erityisesti laserkeilainteknologian osalta laitteiden koot ovat pienentymässä ja hinnat tulossa alaspäin samalla kun niiden suorituskyky ja tarkkuus paranevat. Sensoreita rupeaa olemaan saatavilla myös moniin eri käyttötarkoituksiin ja alustoihin. Kehityssuunta on entistä enemmän suuntautunut automaattisia järjestelmiä ja reaaliaikaista aineistonkäsittelyä kohti. (Kukko et al., 2019) Laserkeilausteknologioista nousussa ovat muun muassa single-photon LiDAR (Swatantran et al., 2016), solid-state LiDAR (Kukko et al., 2019) ja micro-motion LiDAR (GIM, 2018).

Perinteinen maalaserkeilaus on melko hidasta ja erityisesti suurten ja monimutkaisten kohteiden mittaaminen on vaivalloista. Maalaserkeilainten rinnalle onkin noussut erilaisia käsi-käyttöisiä SLAM-algoritmeihin perustuvia mobiilikeilausjärjestelmiä, kuten Zeb Revo RT (GeoSLAM, 2019a), joiden avulla on mahdollista kartoittaa suurempiakin alueita hyvin nopeasti. Näiden keilainten kääntöpuolena on kuitenkin toistaiseksi heikompi mittatarkkuus ja toimintavaikkeudet piirteettömissä ympäristöissä SLAM-teknologian rajoitteiden vuoksi. Teknologian kehityksen ja laitteiden mittatarkkuuden paranemisen myötä mobiilikeilaimet saattavat tulevaisuudessa olla varteenotettava vaihtoehto maalaserkeilaimille etenkin vaikeakulkuisissa kohteissa.

Multispektraalit laserkeilaimet käyttävät tavallisista laserkeilaimista poiketen useampaa eri aallonpituutta, jonka ansiosta niiden sisältämän monipuolisemman spektraalidatan avulla voi tehostaa esimerkiksi pisteiden luokittelua (Kukko et al., 2019)

Mallinnusprosessissa on edelleen vaiheita, jotka on optimoitava manuaalisesti. Manuaalinen työ vie kuitenkin paljon aikaa, jonka vuoksi on tarvetta entistä paremmille automaattisille optimointimenetelmille. Tavoitteena olisi päästä automaattisesti lähemmäs manuaalisen optimoinnin tulosta. Mallia voisi ottaa esimerkiksi BIM puolen elementtikirjastoista, joiden avulla mitattuun dataan voi sovittaa erilaisia valmiita elementtejä. Ongelmana on tosin kulttuurin alan kohteiden ainutlaatuisuus, jonka vuoksi yleispäteviä elementtejä voi olla vaikea hyödyntää mallinnuksessa. (Thomson & Boehm, 2015) Matterport on kehittänyt oman neuroverkkopohjaisen opetetun tekoälynä, Cortex AI:n, joka pystyy muodostamaan 3D-mallia suoraan kuvilta ilman fotogrammetrista mallinnusta. (Matterport, 2019e)

Myös mittauspuolen automatisointi on jokseenkin mahdollista joukkoistamalla. Internet on pullollaan turistien ottamia kuvia erilaisista kulttuuriperintökohteista, joita voi nykyteknikoin hyödyntää fotogrammetristen mallien laskentaan (Snavely et al., 2006). Lisäksi esimerkiksi Ch'ng et al. (2019) ovat esitelleet ideaa kuvapohjaisesta kulttuurin alan kohteiden mittauksen ja mallinnuksen joukkoistamisesta, jolloin tavalliset kansalaiset voisivat suorittaa itsenäisesti erilaisten kulttuurikohteiden mittauksen sekä mallinnuksen laadittujen ohjeiden pohjalta.

Jatkuvan tietotekniikan ja komponenttien kehityksen myötä laskenta- ja piirtotehojen määrä tulee lisääntymään. Tehojen kasvu mahdollistaa yhä yksityiskohtaisempien ja raskaampien mallien laskennan ja reaaliaikaisen visualisoinnin, jonka myötä myös 3D-mallien optimoinnin tarve vähenee.

Tällä hetkellä vain harva fotogrammetrinen laskentasovellus tukee sekä kuva, että laserkeilattua materiaalia. Näissäkin sovelluksissa on omat rajoitteensa mikä tekee hybridimallien tuottamisesta hankalaa. Olemassa olevat laserpistepilviä tukevat sovellukset, kuten Reality Capture antavat kuitenkin toivoa paremmasta ja laajemmasta laserpistepilvien tuesta tulevaisuutta ajatellen.

Yksi tulevaisuutta ajatellen mielenkiintoinen ohjelmisto on Sony Picturesin nykyisin omisaman Nurulizen kehittämä Atom View pistepilvimoottori. Ohjelmisto sisältää työkalut useilla eri tavoilla, kuten laserkeilaamalla, tuotetun volumetrisen pistedatan käsittelyyn ja muuntamiseen virtuaalitodellisuusympäristöihin soveltuviksi malleiksi. Dataa ei muunneta lainkaan teksturoiduiksi pintamalleiksi, vaan sovellus interpoloi pistedatata luoden illuusion pinnasta. Tämän vuoksi säästyy huomattavan paljon tilaa polygonimalleihin verrattuna, mikä mahdollistaa yhä tarkempien interaktiivisten virtuaalitodellisuussovellusten kehittämisen. Sovelluksesta löytyy tuki myös Unreal Engine 4 -pelimoottoriin, jonka avulla malleja voi tuoda suoraan pelimoottoriympäristöön ja käyttää polygonimallien rinnalla. Tämän kaltaiset menetelmät voivat tulevaisuudessa helpottaa 3D-sisällöntuotantoa yksinkertaistamalla tai poistamalla useita työläitä työvaiheita. (Fxguide, 2017; Upload, 2017; Variety, 2019; Nurulize, 2019)

5.4.1 Vaikutukset esimerkkitaustan kannalta

Mittalaitteiden, etenkin mobiililaserkeilainten, kehityksen myötä monimutkaisten ja suurten kohteiden, kuten Dipolin, mittaaminen tulee olemaan yhä nopeampaa ja tarkempaa, jolloin alttius säätilan ja valaistuksen muutoksille pienenee. Esimerkkitaustan kannalta erityisen suurta hyötyä tulee olemaan mallinnusprosessin automaation kehityksestä, sillä mallinnus on edelleen yksittäisistä osista työläin ja eniten aikaa vievä osuus, kuten Dipolin ja Suomenlinnan vankityrmien kohdalla huomattiin. Yleisesti tietokoneiden piirto- ja laskutehojen kasvu tulee nopeuttamaan mallien laskennan eri vaiheita sekä mahdollistamaan raskaampien ja yksityiskohtaisempien mallien esittämisen reaaliaikaisissa virtuaalitodellisuusympäristöissä, jolloin manuaalisen optimointityön määrä vähenee. Myös hybridimallien tuottamisen kannalta fotogrammetristen laskentaohjelmien tuki laserpistepilville olisi merkittävä askel mallin muodostamisen yksinkertaistamisessa. Osakseen uudet ohjelmistot kuten Atom View, voivat kuitenkin tarjota kokonaan vaihtoehtoisen tavan tuottaa mittausdatapohjaisia virtuaalitodellisuuskelpoisia ja pelimoottoriyhteensopivia malleja ilman manuaalisesti tehtäviä aikaa vieviä mallinnusvaiheita.

6 Yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää 3D-mittaus- ja -mallinnusprosessit, joilla erilaisista kulttuurin alan kohteista voi tuottaa automaattisesti tai puoliautomaattisesti pelimoottoriin soveltuvia 3D-malleja. Tuotettavan mallin kriteereiksi asetettiin soveltuvuus pelimoottoreilla tehtävään visualisointiin ja pelillistämiseen laajennetun todellisuuden avulla. Lisäkritereinä olivat visuaalinen realismi, geometrinen tarkkuus sekä mallin keveys.

Kirjallisuuskatsauksessa selvitettiin 3D-mittauksen ja -mallinnuksen sekä pelillistämisen ja peliteknologian hyödyntämisen nykytilaa. Lisäksi tehtiin katsaus erilaisiin kulttuurin alan 3D-sovelluksiin esimerkkien avulla. Lopuksi kuvailtiin pääpiirteittäin nykyaikaisten menetelmäkohtaisten mittaus- ja mallinnusprosessien työvaiheet. Kulttuurin alan 3D-sovelluksia löytyi perinteikkäämmän kulttuuriperintökohteiden digitoinnin lisäksi myös virtuaalimuseo ja -näyttelysovelluksia joissa käyttäjä pystyy tarkastelemaan näytteillä olevia kohteita etänä esimerkiksi omalla tietokoneellaan. Olemassa on myös väliaikaisten tapahtumien digitaalisia versioita, kuten Lapinlahden sairaalan sijoittuva audioinstallaatio sekä 360° kameroin tuotetut livekonserttitallinnat. Lisäksi tarjolla on täysin virtuaalinen elokuvateatterikokemus sekä useita aisteja stimuloiva virtuaalitodellisuusseikkailu The Void.

Ajankohtaisen aiheensa vuoksi työssä pyrittiin selvittämään pelimoottorikäyttöön soveltuvien kulttuurin alan kohteiden 3D-mittaukseen ja -mallintamiseen vaadittavaa työnkulkua kolmen erilaisen esimerkkitapauksen avulla. Esimerkkitapauksina toimivat Dipoli, Kansallismuseon esineet sekä Suomenlinnan vankityrmät, joissa kussakin osallistuttiin osana tutkimusryhmää käytännön mittaus- ja mallinnusprosesseihin. Mittausmenetelminä tapauksissa hyödynnettiin laserkeilausta, fotogrammetriaa sekä syvyyskamerapohjaista mittausta. Mallinnusmenetelmät pitivät sisällään sekä fotogrammetrisilla laskentaohjelmilla tehtävän mittadatapohjaisen mallinnuksen sekä 3D-mallinnusohjelmilla tapahtuvan mittadatapohjaisen mallin päällemallinnuksen. Työn tuloksena syntyi esimerkkitapauksista johdetut prosessikaaviot, jotka pitävät sisällään menetelmäkohtaisen kuvauksen mittauksen ja mallinnuksen eri vaiheista pelimoottorikelpoisen mallin tuotannossa. Varsinaiset esimerkkitapausten prosessit kuvailtiin yksityiskohtaisesti. Soveltuvien prosessien selvittämisen lisäksi pohdittiin menetelmien välistä soveltuvuutta, toimintaa ja rajoituksia mitattujen ja mallinnettujen kohteiden osalta sekä vertailtiin saatuja tuloksia tutkimuskirjallisuudesta löytyviin havaintoihin. Lopuksi pohdittiin tulevaisuuden mahdollisuuksia sekä niiden vaikutuksia esimerkkitapausten kannalta.

Eri menetelmillä katsottiin olevan omat hyvät ja huonot puolensa. Kuvapohjainen menetelmä on halpa ja tuottaa laadukkaat tekstuurit, mutta vaatii toimiakseen erittäin optimaaliset olosuhteet. Hybridimenetelmä on geometrialtaan ja tekstuureiltaan laadukkain ja tuottaa lisäksi mittakaavan aineistoon. Kääntöpuolena on laserkeilainten korkeiden hintojen lisäksi pidemmät prosessointi ja mallinnusajat sekä aineistojen yhdistämisongelmat. Syvyyskamerapohjaiset menetelmät ovat luonteeltaan erittäin nopeita mutta tuottavat heikompileatuista jälkeä kuva- ja hybridimenetelmiin nähden.

Yleisesti ottaen yksiselitteisiä prosessikuvauksia oli vaikea löytää laitteiden ja ohjelmistojen suuren määrän vuoksi, mikä ilmeni osaltaan jo kirjallisuuskatsauksesta. Saaduilla tuloksilla todettiin olevan tiettyjä rajoituksia, jotka voivat osaltaan vaikuttaa johdettujen menetelmien toimintaan. Muun muassa kohteen pinnan ominaisuuksilla, kuten tekstuurilla ja pinnan kiiltävyydellä on suuri vaikutus menetelmien toiminnan kannalta, jonka vuoksi joitain kohteita voi olla hyvin vaikeaa mallintaa näitä menetelmiä käyttäen. Menetelmien toiminta voidaan

taata vain tutkimuksessa käytetyillä ohjelmilla ja laitteilla, joskin vaihtoehtoisilla ohjelmilla ja laitteilla voidaan päästä samanlaiseen lopputulokseen. Lisäksi menetelmällä tuotetut mallit soveltuvat vain tietokoneilla pyöritettäviin virtuaalitodellisuussovelluksiin ja esimerkiksi laajennetun todellisuuden mobiilisovellukset voivat vaatia malleilta lisäoptimointia.

Menetelmien voidaan katsoa hyötyvän tulevaisuudessa muun muassa mittausteknologian ja tietotekniikan kehityksestä, jotka parantavat aineistojen keräys- ja käsittelyaikoja. Suurta hyötyä voidaan nähdä mallinnuksen automaation kehityksessä sekä laskentasovellusten laajemmalla pistepilvien tuella. Lisäksi uudet lähestymistavat, kuten Atom View, voivat tarjota tehokkaamman tavan pelimoottorikelpoisten mallien tuottamiseen.

Lähteet

- Adobe. (2019a) *Adobe Photoshop*. Saatavissa: <https://www.photoshop.com/> [Viitattu 21.2.2019]
- Adobe. (2019b) *Adobe Photoshop Lightroom CC*. Saatavissa: <https://www.adobe.com/fi/products/photoshop-lightroom.html> [Viitattu 21.2.2019]
- Agisoft. (2019) *Photoscan*. Saatavissa: <https://www.agisoft.com/> [Viitattu 21.2.2019]
- Ahlavuo, M., Hyypä, H., Parkkola, T., & Kurkela, M. (2016) *Taustaa digitaalisuudesta ja 3D-virtuaalisuudesta kulttuurialalla*. Digitaalista Tulevaisuutta, 42-49. [Viitattu 16.4.2018]
- Anderson, E. F., McLoughlin, L., Liarokapis, F., Peters, C., Petridis, P. & de Freitas, S. (2010) *Developing Serious Games for Cultural Heritage A State-of-the-Art Review*. Virtual Reality 14(4):255-275. Saatavissa: DOI: 10.1007/s10055-010-0177-3 [Viitattu 17.10.2018]
- Arts Professional. (2017) *The virtual orchestra*. Saatavissa: <https://www.artsprofessional.co.uk/magazine/307/case-study/virtual-orchestra> [Viitattu 26.3.2019]
- Autodesk. (2019) *3DsMax*. Saatavissa: <https://www.autodesk.fi/products/3ds-max/features> [Viitattu 15.2.2019]
- B&H. (2019) *DJI Phantom 4 Pro+ Version 2.0 Quadcopter*. Saatavissa: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1406920-REG/dji_cp_pt_00000234_01_phantom_4_pro_version.html [Viitattu 12.9.2019]
- Babylon.js. (2019) *Babylon.js*. Saatavissa: <https://www.babylonjs.com/> [Viitattu 6.9.2019]
- Balsa-Barreiro, J. & Fritsch, D. (2017) *Generation of visually aesthetic and detailed 3D models of historical cities by using laser scanning and digital photogrammetry*. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.daach.2017.12.001 [Viitattu 17.10.2018]
- Bekele, M.K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E.S. & Gain, J. (2018) *A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage*. ACM Journal on Computing and Cultural Heritage, 11, 2, Article 7, 36 pages. Saatavissa: <https://doi.org/10.1145/3145534> [Viitattu 8.3.2019]
- Bigscreen. (2019a) *Bigscreen*. Saatavissa: <https://bigscreenvr.com/about/> [Viitattu 20.2.2019]
- Bigscreen. (2019b) *Bigscreen*. Saatavissa: <https://bigscreenvr.com/press/> [Viitattu 12.9.2019]
- Bourke, P. (2012) *Automatic 3D reconstruction: An exploration of the state of art*. GSTF Journal on Computing (JoC) Vol.2 No.3, October 2012. Saatavissa: DOI: 10.51762010-3043_2.3.189 [Viitattu 29.3.2019]

- Canciani, M., Saccone, M., Conigliaro, E., Del Grasso, M. & Papalini, P. (2016) *3D Survey and augmented reality for cultural heritage. The Case study of Aurelian wall at Castra Praetoria in Rome*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5. Saataavissa: DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-931-2016 [Viitattu 22.5.2018]
- Ch'ng, E., Cai, S., Zhang, T.E. & Leow, F-T. (2019) *Crowdsourcing 3D cultural heritage: best practice for mass photogrammetry*. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development. Saataavissa: <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-03-2018-0018>
- Christopoulou, E. & Xinogalos, S. (2017) *Overview and Comparative Analysis of Game Engines for Desktop and Mobile Devices*. International Journal of Serious Games, Volume 4, Issue 4, ISSN: 2384-8766. Saataavissa: <http://dx.doi.org/10.17083/ijsg.v4i4.194> [Viitattu 29.8.2019]
- Consumer Technology Association. (2017) *Virtual Reality Rocks: Consumers Who Know VR Are Excited About Its Future, says CTA Report*. Saataavissa: <https://www.cta.tech/News/Press-Releases/2017/February/Virtual-Reality-Rocks-Consumers-Who-Know-VR-Are-E.aspx> [Viitattu 29.8.2019]
- Debevec, P., Yizhou, Y. & Borshukov, G. (1998) *Efficient View-Dependent Image-Based Rendering with Projective Texture-Mapping*. Rendering Techniques '98. Eurographics. Saataavissa: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6453-2_10 [Viitattu 27.8.2019]
- Deggim, S., Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., & Hinrichsen, N. (2017) *Segeberg 1600—Reconstructing a Historic Town for Virtual Reality Visualisation as an Immersive Experience*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8. Saataavissa: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-87-2017> [Viitattu 26.2.2018]
- Epic Games. (2019) *Unreal Engine 4*. Saataavissa: <https://www.unrealengine.com/en-US/features> [Viitattu 21.2.2019]
- Faro. (2012) *Faro Laser Scanner Focus^{3D}*. E866-FAROLaserScannerFocus3DManual-October2012-EN.pdf [Viitattu 5.6.2018]
- Faro. (2013) *FARO Focus^{3D} Features, Benefits & Technical Specifications*. FARO_-Focus_3D.pdf [Viitattu 5.6.2018]
- Faro. (2017) *Scene 7.1 User Manual*. E1807_SCENE_7.1_User_Manual_EN.pdf [Viitattu 5.6.2018]
- Faro. (2019a) *Importing and Exporting Ordered and Unordered Files in SCENE*. Saataavissa: https://knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/Understanding_Ordered_and_Unordered_Files [Viitattu 2.9.2019]
- Faro. (2019b) *Faro Focus*. Saataavilla: <https://www.faro.com/products/construction-bim/faro-focus/> [Viitattu 12.9.2019]

Furukawa, Y. & Ponce, J. (2010) *Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis DMVR*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume: 32, Issue: 8. Page(s): 1362 – 1376. Saatavissa: DOI: 10.1109/TPAMI.2009.161 [Viitattu 29.8.2019]

Fxguide. (2017) *Atom View*. Saatavissa: <https://www.fxguide.com/fxfeatured/atom-view/> [Viitattu 11.9.2019]

Georgantas, A., Brédif, M. & Pierrot-Desseilligny, M. (2012) *An Accuracy Assessment of Automated Photogrammetric Techniques for 3D Modeling of Complex Interiors*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B3. Saatavissa: DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-23-2012 [Viitattu 4.3.2019]

GeoSLAM. (2019a) *Zeb Revo RT*. Saatavissa: <https://geoslam.com/solutions/zeb-revo-rt/> [Viitattu 23.9.2019]

GeoSLAM. (2019b) *Zeb Revo RT*. Product Card. Saatavissa: <https://geoslam.com/wp-content/uploads/2019/06/RT-Product-Card.pdf> [Viitattu 23.9.2019]

GIM. (2018) *Next-generation Lidar Solution for Self-driving Cars*. GIM International News. Saatavissa: <https://www.gim-international.com/content/news/next-generation-lidar-solution-for-self-driving-cars?output=pdf> [Viitattu 6.9.2019]

Godot. (2019) *Godot*. Saatavissa: <https://godotengine.org/> [Viitattu 6.9.2019]

Grenzdörffer, G. J., Naumann, M., Niemeyer, F. & Frank, A. (2015) *Symbiosis of UAS photogrammetry and TLS for surveying and 3D modelling of cultural heritage monuments - A Case study about the cathedral of St. Nicholas in the city of Greifswald*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4. Saatavissa: DOI:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-91-2015 [Viitattu 2.3.2018]

Guarnieri, A., Remondino, F. & Vettore, A. (2006) *Digital Photogrammetry and TLS Data Fusion Applied to Cultural Heritage 3D Modeling*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI Part 5. Saatavissa: https://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/1216_Dresden06.pdf [Viitattu 23.5.2018]

Haala, N. & Alshawabkeh, Y. (2006) *Combining laser scanning and photogrammetry - A Hybrid approach for heritage documentation*. The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage VAST, pp.163-170. Saatavissa: DOI: 10.2312/VAST/VAST06/163-170 [Viitattu 8.2.2019]

HAM. (2018) *The Virtual Orchestra: Sibelius 360*. Saatavissa: <https://www.hamhelsinki.fi/2018/06/11/virtuaaliorkesteri-sibelius-360/> [Viitattu 1.2.2019]

- Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X. & Fox, D. (2012) *RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments*. The International Journal of Robotics Research 31(5):647-663. Saatavissa: DOI: 10.1177/0278364911434148 [Viitattu 19.2.2019]
- Inition. (2016) *Philharmonia Orchestra: 'Best Seat in the House' VR*. Saatavissa: https://www.inition.co.uk/case_study/introducing-virtual-reality-orchestra/ [Viitattu 31.10.2018]
- Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A. & Kager, H. (2004) *Terrestrial laserscanning and photogrammetry – acquisition techniques complementing one another*. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/250903539_Terrestrial_laserscanning_and_photogrammetry-Acquisition_techniques_complementing_one_another [22.3.2019]
- Julin, A., Jaalama, K., Virtanen, J-P., Maksimainen, M., Kurkela, M., Hyypä, J. & Hyypä, H. (2019) *Automated multi-sensor 3D reconstruction for the web*. International Journal of Geo-Information 8(5):221. Saatavissa: DOI: 10.3390/ijgi8050221 [Viitattu 27.8.2019]
- Kersten, T. P., Mechelke, K. & Maziull, L. (2015) *3D model of Al Zubarah fortress in Qatar - Terrestrial laser scanning vs. dense image matching*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4. Saatavissa: DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-1-2015 [Viitattu 17.10.2018]
- Kersten, T. P., Tschirschwitz, F. & Deggim, S. (2017) *Development of a virtual museum including a 4D presentation of building history in virtual reality*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W3. Saatavissa: DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-361-2017. [17.10.2018]
- Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Chen, Y. (2012) *Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance*. Sensors 2012, 12(9), 11712-11733; Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/s120911712> [Viitattu 20.9.2019]
- Kukko, A., Kaartinen, H. & Hyypä, J. (2019) *Technologies for the Future: A Lidar Overview. Building the Capability for High-density 3D Data*. GIM International, Article. Saatavissa: <https://www.gim-international.com/content/article/technologies-for-the-future-a-lidar-overview-2> [Viitattu 6.9.2019]
- Lachambre, S., Lagarde, S. & Jove, C. (2017) *Unity Photogrammetry Workflow*. Saatavissa: https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf [Viitattu 26.2.2019]
- Lerma, J. L., Cabrelles, M. & Navarro, S. (2015) *Fusion of Range-Based Data and Image-Based Datasets for Efficient Documentation of Cultural Heritage Objects and Sites*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W7. Saatavissa: DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-277-2015. [Viitattu 29.3.2018]
- Litomisky, K. (2012) *Consumer RGB-D Cameras and their Applications*. Saatavissa: <http://alumni.cs.ucr.edu/~klitomis/files/RGBD-intro.pdf> [Viitattu 21.2.2019]

- Lo Brutto, M. & Spera, M. G. (2011) *Image-Based and Range-Based 3d Modelling of Archaeological Cultural Heritage: The Telamon of the Temple of Olympian Zeus In Agrigento (Italy)*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16. Saatavissa: DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-515-2011 [Viitattu 21.3.2019]
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Harley, I. (2006) *Close Range Photogrammetry - Principles, Methods and Applications*. ISBN 1-870325-50-8.
- Matterport. (2017) *Photographer opens the National Gallery to the world using Matterport 3D virtual tour!* Saatavissa: <https://matterport.com/blog/2017/12/14/national-gallery-embrace-matterport-3d-virtual-tour-technology/> [Viitattu 24.10.2018]
- Matterport. (2019a) *The Matterport Pro2 3D Camera*. Saatavissa: <https://matterport.com/pro2-3d-camera/> [Viitattu 1.8.2019]
- Matterport. (2019b) *Download the MatterPak™ Bundle*. Saatavissa: <https://support.matterport.com/hc/en-us/articles/115013869728-Download-the-MatterPak-Bundle> [Viitattu 1.8.2019]
- Matterport. (2019c) *Matterport Pro2 3D Camera Specifications*. Saatavissa: <https://support.matterport.com/hc/en-us/articles/115004093167-Matterport-Pro2-3D-Camera-Specifications> [Viitattu 12.9.2019]
- Matterport. (2019d) *Matterport*. Saatavissa: <https://buy.matterport.com/> [Viitattu 6.9.2019]
- Matterport. (2019e) *Matterport Unveils New Cloud Platform, Unlocking Ubiquitous Access to 3D Technology*. Saatavissa: <https://matterport.com/matterport-news/matterport-unveils-new-cloud-platform-unlocking-ubiquitous-access-3d-technology/> [Viitattu 13.9.2019]
- Matthews, N. A. (2008) *Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation*. Technical Note 428. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado. 42 pp. Saatavissa: https://permanent.access.gpo.gov/gpo67520/TN_428.pdf [Viitattu 27.2.2019]
- Mazuryk, T. & Gervautz, M. (1999) *Virtual Reality - History, Applications, Technology and Future*. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/2617390_Virtual_Reality_-_History_Applications_Technology_and_Future [Viitattu 19.2.2019]
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994) *A taxonomy of mixed reality visual displays*. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 77(12), 1321-1329. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/231514051_A_Taxonomy_of_Mixed_Reality_Visual_Displays [Viitattu 23.7.2019]
- MIT Technology Review. (2015) *Inside the First VR Theme Park, by Rachel Metz*. Saatavissa: <https://www.technologyreview.com/s/544096/inside-the-first-vr-theme-park/> [Viitattu 2.9.2019]

- Morschheuser, B., Hassan, L., Werder, K. & Hamari, J. (2017) *How to design gamification? A method for engineering gamified software*. Information and Software Technology, in press. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.10.015> [Viitattu 14.3.2019]
- Museovirasto. (2019) *Museovirasto*. Saatavissa: <https://www.museovirasto.fi/fi/tietoa-meista/organisaatio> [Viitattu 6.9.2019]
- Nikon. (2019a) *D800E*. Saatavissa: https://www.nikon.fi/fi_FI/product/discontinued/digital-cameras/2015/d800e [Viitattu 6.9.2019]
- Nikon. (2019b) *D810*. Saatavissa: https://www.nikon.fi/fi_FI/product/digital-cameras/slr/professional/d810 [Viitattu 6.9.2019]
- The National Gallery. (2011) *Take a virtual tour of the National Gallery*. Saatavissa: <https://www.nationalgallery.org.uk/visiting/virtual-tours> [Viitattu 21.2.2019]
- Navarro, A., Pradilla, J. V. & Rios, O. (2012) *Open Source 3D Game Engines for Serious Games Modeling*. Modeling and Simulation in Engineering, ISBN 978-953-51-0012-6. Saatavissa: <https://www.intechopen.com/books/modeling-and-simulation-in-engineering/open-source-3d-game-engines-for-serious-games-modeling> [Viitattu 9.1.2019]
- Nurulize. (2019) *Atom View*. Saatavissa: <http://nurulize.com/atom-view/> [Viitattu 11.9.2019]
- Oikarinen, T. (2016). *Utilisation of a game engine for archaeological visualisation*. Conference: CAA 2015 KEEP THE REVOLUTION GOING. Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Oxford: Archaeopress, 27–34. [Viitattu 25.5.2018]
- Pedersen, I., Gale, N., Mirza-Babaei, P. & Reid, S. (2017) *More than Meets the Eye: The Benefits of Augmented Reality and Holographic Displays for Digital Cultural Heritage*. CM J. Comput. Cult. Herit. 10, 2, Article 11 (March 2017), 15 pages. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1145/3051480> [Viitattu 25.5.2018]
- Philharmonia Orchestra. (2016) *Virtual Reality: Sibelius 5*. Saatavissa: http://www.philharmonia.co.uk/digital/virtual_reality_and_apps/sibelius_5 [Viitattu 1.2.2019]
- Pulcrano, M., Scandurra, S., Minin, G. & Di Luggo, A. (2019) *3D Cameras Acquisitions for the Documentation of Cultural Heritage*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W9. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-639-2019> [Viitattu 24.7.2019]
- Rahaman, H., Champion, E. & Bekele, M. (2018) *From photo to 3D to mixed reality: A complete workflow for cultural heritage visualization and experience*. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage Volume 13. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00102> [Viitattu 1.8.2019]

- Rahaman, H. & Champion, E. (2019) *To 3D or Not 3D: Choosing a Photogrammetry Workflow for Cultural Heritage Groups*. Heritage 2019, 2, 112. Saatavissa: DOI:10.3390/heritage2030112 [Viitattu 1.8.2019]
- Reality Capture. (2019) *Reality Capture*. Saatavissa: <https://www.capturingreality.com/Product> [Viitattu 21.2.2019]
- Reality Capture. (2019) *RC's input / import file formats*. Saatavissa: <https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115001527832-RC-s-input-import-file-formats> [Viitattu 2.9.2019]
- Remondino, F. & El Hakim, S. (2006) *Image-based 3D Modelling: A Review*. The Photogrammetric Record 21(115): 269–291. Saatavissa: DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x [Viitattu 24.7.2019]
- Remondino, F. (2011) *Heritage recording and 3d modeling with photogrammetry and 3d scanning*. Remote Sens. 3, 1104–1138. Saatavissa: DOI:10.3390/rs3061104 [Viitattu 1.3.2018]
- Rizom. (2019) *RizomUV Virtual Spaces*. Saatavissa: <https://www.rizom-lab.com/rizomuv-vs/> [Viitattu 6.9.2019]
- Road to VR. (2016) *Live Nation & NextVR to Broadcast Hundreds of Live Performances in VR*. Saatavissa: <https://www.roadtovr.com/live-nation-nextvr-broadcast-hundreds-live-performances-vr/> [Viitattu 5.4.2019]
- Road to VR. (2019) *VR Attraction The VOID Plans to More Than Double in Size with 25 New Locations*. Saatavissa: <https://www.roadtovr.com/the-void-expansion-plans-double-size-locations/> [Viitattu 6.9.2019]
- Rönholm, P., Honkavaara, E., Litkey, P., Hyypä, H. & Hyypä, J. (2007) *Integration of laser scanning and photogrammetry*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, volume 36, part 3 / W52, pages 355–362. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Diss/2010/isbn9789526033488/article1.pdf> [Viitattu 22.3.2019]
- Shao, Z., Li, C., Zhong, S., Liu, B., Jiang, H. & Wen, X. (2015) *3D Reconstruction of cultural tourism attractions from indoor to outdoor based on portable four-camera stereo vision system*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-4/W5. Saatavissa: DOI:10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-193-2015 [Viitattu 19.2.2019]
- Sheng, W., Ishikawa, K., Tanaka, H. T., Tsukamoto, A. & Tanaka, S. (2015). *Photorealistic VR Space Reproductions of Historical Kyoto Sites based on a Next-Generation 3D Game Engine*. Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering. 1. 188–204. Saatavissa: DOI: 10.15748/jasse.1.188. [Viitattu 17.5.2018]

- Sieck, J., Pfeiffer, F., Reinhardt, J., Remes, K. & Thiele-Maas, M. (2016) *Virtual and augmented reality in cultural context*. Electrotechnic and Computer Systems No. 23 (99). Saatavissa: DOI: 10.15276/eltecs.23.99.2016.14 [Viitattu 5.4.2019]
- Slashfilm. (2017) *Paramount Has Created a Completely Virtual Movie Theater; Is This a Game Changer?* Saatavissa: <http://www.slashfilm.com/virtual-reality-movie-theater/> [Viitattu 31.10.2018]
- Smithsonian 3D Digitization. (2018) *Smithsonian 3D Digitization*. Saatavissa: <https://3d.si.edu/> [Viitattu 31.1.2019]
- Smithsonian National Museum of Natural History. (2018) *Museum Virtual Tours*. Saatavissa: <https://naturalhistory.si.edu/virtual-tour> [Viitattu 31.1.2019]
- Snively, N., Seitz, S. & Szeliski, R. (2006) *Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D*. ACM Transactions on Graphics (TOG) Volume 25 Issue 3 Pages 835-846. Saatavissa: DOI>10.1145/1141911.1141964 [Viitattu 9.9.2019]
- Sony. (2019) *Sony*. Saatavissa: <https://www.sony.fi/electronics/cyber-shot-kompaktikamera/dsc-rx1rm2/buy/dscrx1rm2.ce3> [Viitattu 6.9.2019]
- Structure. (2019) *Structure sensor*. Saatavissa: <https://structure.io/structure-sensor> [Viitattu 6.9.2019]
- Suomenlinna. (2019) *Suomenlinna*. Saatavissa: <https://www.suomenlinna.fi/> [Viitattu 6.9.2019]
- Susi, T., Johannesson, M. & Backlund, P. (2007) *Serious Games – An Overview*. Technical Report HS- IKI -TR-07-001. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:2416/FULLTEXT01.pdf> [Viitattu 23.9.2019]
- Swatantran, A., Tang, H., Barrett, T., DeCola, P.L. & Dubayah, R. (2016) *Rapid, High-Resolution Forest Structure and Terrain Mapping over Large Areas using Single Photon Lidar*. Scientific Reports 6:28277. Saatavissa: DOI: 10.1038/srep28277
- Thomson, C., Apostolopoulos, G., Backes, D. & Boehm, J. (2013) *Mobile laser scanning for indoor modelling*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2. Saatavissa: DOI:10.5194/isprsannals-II-5-W2-289-2013 [Viitattu 20.9.2019]
- Thomson, C. & Boehm, J. (2015) *Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM*. Remote Sensing 7(9):11753-11775. Saatavissa: DOI: 10.3390/rs70911753 [Viitattu 13.9.2019]
- Tsichritzis, D. & Gibbs, S. (1991) *Virtual Museums and Virtual Realities*. International Conference on Hypermedia & Interactivity in Museums. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.93.6636> [Viitattu 14.3.2019]

Turppa, T., Hyypä, H., Airaksinen, H., Ahlavo, M. & Hyypä, J. (2014). *Näkökultmia pelinkehityksestä Unity 3D-pelimoottorilla*. Yhteistä tulevaisuutta rakentamassa ja kartoittamassa, 91-110. [Viitattu 11.4.2018]

Unity. (2019) *Unity*. Saatavissa: <https://unity3d.com/> [21.2.2019]

Upload. (2017) *Atom View Brings Real-World Scans Into VR With Realistic Results*. Saatavissa: <https://uploadvr.com/atom-view-brings-real-world-scans-vr-realistic-results/> [Viitattu 11.9.2019]

Variety. (2019) *Sony Pictures Buys Nurulize, a Virtual Production Software Startup*. Saatavissa: <https://variety.com/2019/digital/news/sony-innovation-studios-nurulize-acquisition-1203261061/> [Viitattu 11.9.2019]

Virtanen, J. P., Kurkela, M., Turppa, T., Vaaja, M. T., Julin, A., Kukko, A., ... & Hyypä, H. (2018) *Depth camera indoor mapping for 3D virtual radio play*. The Photogrammetric Record 33(162): 171–195. Saatavissa: DOI: 10.1111/phor.12239 [Viitattu 26.2.2018]

The Void. (2019) *Frequently asked questions*. Saatavissa: <https://www.thevoid.com/faq> [Viitattu 6.9.2019]

The Void. (2019) *What is the Void*. Saatavissa: <https://www.thevoid.com/what-is-the-void/> [Viitattu 6.9.2019]

Vosselman, G. & Maas, H. G. (2010) *Airborne and terrestrial laser scanning*. ISBN 978-1904445-87-6 [Viitattu 21.2.2019]

Walczak, K., Wojciech, C. & White, M. (2006) *Virtual Museum Exhibitions*. IEEE Computer, Vol. 39, No. 3, pp. 93-95. Saatavissa: DOI: 10.1109/MC.2006.108 [Viitattu 8.3.2019]

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. & Reynolds, J.M. (2012) *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. Geomorphology. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021> [Viitattu 29.8.2019]

Wired. (2017) *Live concerts take the virtual out of virtual reality*. Saatavissa: <https://www.wired.com/brandlab/2017/07/live-concerts-take-virtual-virtual-reality/> [Viitattu 31.10.2018]

YLE. (2016). *Lapinlahden entinen mielisairaala herää eloon – kuuntele, millaista siellä on*. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-9113064> [Viitattu 26.2.2018]